

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO TRAZADOR DE CURVAS
POTENCIOSTÁTICAS Y POTENCIODINÁMICAS PARA PRUEBAS DE
LABORATORIO QUE DETERMINEN EL COMPORTAMIENTO DE MATERIALES
EN MEDIOS CORROSIVOS**

**RUBÉN DARÍO CUADRADO MARTÍNEZ
MARÍA DEL ROSARIO DEL VALLE ALONSO
YELITZA DEL CARMEN ARAMENDIZ QUIROZ**

**CORPORACIÓN UNIVERSITARIA TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y MECATRÓNICA
CARTAGENA DE INDIAS, D.T. Y C**

2003

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO TRAZADOR DE CURVAS
POTENCIOSTÁTICAS Y POTENCIODINÁMICAS PARA PRUEBAS DE
LABORATORIO QUE DETERMINEN EL COMPORTAMIENTO DE MATERIALES
EN MEDIOS CORROSIVOS**

**RUBÉN DARÍO CUADRADO MARTÍNEZ
MARÍA DEL ROSARIO DEL VALLE ALONSO
YELITZA DEL CARMEN ARAMENDIZ QUIROZ**

**Trabajo presentado como requisito para optar el título de Ingenieros
Electrónicos**

**Director
OSCAR SEGUNDO ACUÑA CAMACHO
Ingeniero Electricista**

**CORPORACIÓN UNIVERSITARIA TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y MECATRÓNICA
CARTAGENA DE INDIAS, D.T. Y C
2003**

Cartagena, 17 de Junio de 2003

Señores

COMITÉ DE PROYECTOS DE GRADO

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y MECATRÓNICA

CORPORACIÓN UNIVERSITARIA TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR

La ciudad

Distinguidos señores:

La presente tiene como objetivo presentar a su consideración para estudio y aprobación, el proyecto titulado **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO TRAZADOR DE CURVAS POTENCIOSTÁTICAS Y POTENCIODINÁMICAS PARA PRUEBAS DE LABORATORIO QUE DETERMINEN EL COMPORTAMIENTO DE MATERIALES EN MEDIOS CORROSIVOS”**, como requisito para optar el título de Ingeniero Electrónico.

Cordialmente,

YELITZA DEL CARMEN ARAMENDIZ QUIROZ

Cartagena, 17 de Junio de 2003

Señores

COMITÉ DE PROYECTOS DE GRADO

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y MECATRÓNICA

CORPORACIÓN UNIVERSITARIA TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR

La ciudad

Distinguidos señores:

La presente tiene como objetivo presentar a su consideración para estudio y aprobación, el proyecto titulado **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO TRAZADOR DE CURVAS POTENCIOSTÁTICAS Y POTENCIODINÁMICAS PARA PRUEBAS DE LABORATORIO QUE DETERMINEN EL COMPORTAMIENTO DE MATERIALES EN MEDIOS CORROSIVOS”**, como requisito para optar el título de Ingeniero Electrónico.

Cordialmente,

MARÍA DEL ROSARIO DEL VALLE ALONSO

Cartagena, 17 de Junio de 2003

Señores

COMITÉ DE PROYECTOS DE GRADO

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y MECATRÓNICA

CORPORACIÓN UNIVERSITARIA TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR

La ciudad

Distinguidos señores:

La presente tiene como objetivo presentar a su consideración para estudio y aprobación, el proyecto titulado **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO TRAZADOR DE CURVAS POTENCIOSTÁTICAS Y POTENCIODINÁMICAS PARA PRUEBAS DE LABORATORIO QUE DETERMINEN EL COMPORTAMIENTO DE MATERIALES EN MEDIOS CORROSIVOS”**, como requisito para optar el título de Ingeniero Electrónico.

Cordialmente,

RUBÉN DARÍO CUADRADO MARTÍNEZ

Cartagena, 17 de Junio de 2003

Señores

COMITÉ DE PROYECTOS DE GRADO

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y MECATRÓNICA

CORPORACIÓN UNIVERSITARIA TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR

La ciudad

Distinguidos señores:

Por medio de la presente me permito comunicarles que el proyecto titulado **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO TRAZADOR DE CURVAS POTENCIOSTÁTICAS Y POTENCIODINÁMICAS PARA PRUEBAS DE LABORATORIO QUE DETERMINEN EL COMPORTAMIENTO DE MATERIALES EN MEDIOS CORROSIVOS”**, ha sido desarrollado de acuerdo con los objetivos establecidos.

Como director considero que el trabajo es satisfactorio y cumple con todos los requerimientos necesarios para ser presentado por sus autores para su evaluación. Por tal motivo hago entrega formal del proyecto.

Cordialmente,

ING. OSCAR SEGUNDO ACUÑA CAMACHO

Director del proyecto

Cartagena, 17 de Junio de 2003

Señores

COMITÉ DE PROYECTOS DE GRADO

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y MECATRÓNICA

CORPORACIÓN UNIVERSITARIA TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR

La ciudad

Distinguidos señores:

Por medio de la presente me permito comunicarles que el proyecto titulado **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO TRAZADOR DE CURVAS POTENCIOSTÁTICAS Y POTENCIODINÁMICAS PARA PRUEBAS DE LABORATORIO QUE DETERMINEN EL COMPORTAMIENTO DE MATERIALES EN MEDIOS CORROSIVOS”**, ha sido desarrollado de acuerdo con los objetivos establecidos.

Como asesor considero que el trabajo es satisfactorio y cumple con todos los requerimientos necesarios para ser presentado por sus autores para su evaluación. Por tal motivo hago entrega formal del proyecto.

Cordialmente,

ING. BENJAMÍN ARANGO

Asesor del proyecto

Artículo 105 del reglamento Académico

“La institución se reserva el derecho de propiedad intelectual de todos los Trabajos de Grado aprobados, los cuales no pueden ser explotados comercialmente sin su autorización. Esta observación debe quedar impresa en parte visible del proyecto”.

Nota de aceptación:

Presidente del jurado

Jurado

Jurado

Ciudad y fecha (día, mes, año)

DEDICATORIA

En este espacio quiero agradecer a Dios, a mis padres hermanos y amigos que me apoyaron en forma incesante e incondicional.

Quiero agradecer al Ing. Oscar Segundo Acuña por no dejarme desfallecer en este proyecto.

A mis compañeros de tesis que hoy en día son mis mejores amigos.

Agradezco al Ing. Benjamín Arango por su orientación.

Por último quiero dedicarle este título a Paola Cuadrado y Dora Cecilia que son las dos mujeres de mi vida.

RUBEN CUADRADO MARTINEZ

DEDICATORIA

Agradezco a Dios, por guiarme.

A mis padres y hermanos quienes me apoyaron siempre.

MARIA DEL ROSARIO DEL VALLE ALONSO

DEDICATORIA

Agradezco a Dios por haberme iluminado siempre que lo necesite.

A mis padres y mi hermana, por confiar en mí en todo momento.

Al Ing. Oscar Acuña por su orientación.

Al Ing. Benjamín Arango por sus aportes.

A mis compañeros, porque juntos hemos logrado alcanzar la cima.

A Gabriel y amigos, por su apoyo incondicional.

YELITZA ARAMENDIZ QUIROZ

AGRADECIMIENTOS

Los autores del proyecto desean agradecer a las siguientes personas su valiosa colaboración en el desarrollo del mismo:

Oscar Acuña. Ingeniero Electricista. Director del proyecto.

Benjamín Arango. Ingeniero Metalúrgico. Asesor del proyecto.

Alcides Ramos. Ingeniero Electrónico.

Ferney Vesga. Físico. Instituto para la Investigación de la Corrosión (CIC).

José Gregorio Rubio. Ingeniero Electrónico. Docente de la ENAP.

José Rivera. Director del Instituto Tecnológico de Chihuahua- Mexico.

Alex Santoyo. Ingeniero Electrónico.

Carlos González. Ing. Industrial. Ecopetrol.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	
1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL	38
1.1 CORROSIÓN ELECTROQUÍMICA	38
1.2 PROCESOS FARADAICOS	40
1.2.1 Teoría de la doble capa	40
1.2.2 Capacitancia y carga del electrodo	41
1.3 POTENCIAL DE CORROSIÓN	43
1.3.1 Medición del potencial de corrosión	43
1.3 POTENCIAL Y CORRIENTE	44
1.5 TÉCNICAS ELECTROQUÍMICAS PARA LA EVALUACIÓN DE LA CORROSIÓN	45
1.5.1 Técnicas potencioestáticas	47
1.5.2 Técnica de polarización anódica potenciodinámica	48
1.5.3 Técnica de polarización cíclica	50
1.5.4 Extrapolación de Tafel	52
1.5.5 Resistencia de polarización lineal	56
1.6 CELDA ELECTROQUÍMICA	59
1.6.1 Diseño de la celda	59
1.6.2 Modelo electrónico de la celda electroquímica	62

1.6.2.1 Resistencia descompensada	62
1.6.3 Electrodo de referencia (ER)	65
1.6.3.1 Electrodo de plata/cloruro de plata (Ag/AgCl)	66
1.6.4 Electrodo auxiliar o contraelectrodo (EA)	67
1.6.5 Electrodo de trabajo (ET)	67
1.7 POTENCIOSTATO	67
2. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO CONSTRUIDO	69
2.1 ETAPAS DEL POTENCIOSTATO	69
2.1.1 Fuente de alimentación	69
2.1.2 Circuito de control del potencióstato	79
2.1.2.1 Diagrama de bloques del circuito de control	79
2.1.3 Circuito convertidor de corriente a voltaje	90
2.2 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	92
2.3 DESCRIPCIÓN DE CONTROLES	92
2.4 ESPECIFICACIONES	94
3. CELDA ELECTROQUÍMICA DE PRUEBA	96
3.1 CONSTITUCIÓN	96
3.2 ELEMENTOS	98
3.2.1 Electrodo de referencia	99
3.2.2 Electrodo auxiliar	99
3.2.3 Electrodo de trabajo	100
3.2.4 Tubo de Luggin	100
3.3 ESPECIFICACIONES	101

4. SOFTWARE	102
4.1 PROGRAMA DE CONTROL	102
4.1.1 Lenguaje de programación	102
4.1.2 Características	103
4.1.3 Descripción	104
4.1.3.1 Barra de herramientas	106
4.1.3.2 Barra de menús	107
4.2 PROGRAMA DEL MICROCONTROLADOR	118
4.2.1 Código fuente	118
4.3 REQUISITOS DEL SISTEMA	134
5. RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN	135
6. CONCLUSIONES	136
7. RECOMENDACIONES	137
BIBLIOGRAFÍA	
ANEXOS	

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Rangos de entrada del ADS7813	83
Tabla 2. Valores de ganancia para el INA128	85
Tabla 3. Rangos de corriente medidos por el circuito convertidor de corriente a voltaje	90
Tabla 4. Iconos en las barras de herramientas	106

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Dirección del flujo de corriente y electrones en una celda de corrosión	39
Figura 2. Esquema de la doble capa según Helmholtz	42
Figura 3. Convenciones de polaridad para graficar curvas de potencial vs. Corriente	45
Figura 4. Diagrama de I vs. T para un sistema potencioestático	48
Figura 5. Gráfica típica de polarización anódica potenciodinámica	50
Figura 6. Gráfica típica de polarización cíclica	52
Figura 7. Gráfica experimental de Tafel	55
Figura 8. Gráfica típica de la resistencia de polarización	58
Figura 9. Celda de prueba de corrosión electroquímica típica	60
Figura 10. Modelo electrónico simple de una celda electroquímica	63
Figura 11. Potenciostato	68
Figura 12. Circuito de la fuente de +5 V	71
Figura 13. Circuito de la fuente de alimentación	78
Figura 14. Diagrama de bloques del circuito de control	80
Figura 15. Circuitos de ajuste manual de ganancia y offset del DAC714;	82

modo bipolar (rango de salida de -5 V a $+5\text{ V}$)

Figura 16. Configuración de pines del ADS7813 para un rango de entrada de $\pm 3.33\text{ V}$ 84

Figura 17. Conexiones básicas del INA128 86

Figura 18. Descripción de pines del conector DB-9 de la interface serial RS-232C 87

Figura 19. Configuración de pines del MAX232 88

Figura 20. Circuito de control del potencióstato 89

Figura 21. Circuito convertidor de corriente a voltaje 91

Figura 22. Dimensiones del potencióstato 92

Figura 23. Panel frontal del potencióstato 93

Figura 24. Panel posterior del potencióstato 93

Figura 25. Dimensiones de la celda electroquímica 97

Figura 26. Disposición de los elementos en la celda electroquímica 98

Figura 27. Ventana de inicio 105

Figura 28. Ventana principal de la polarización potencióstática 105

Figura 29. Ventana de calibración del equipo 105

Figura 30. Barra de menús 107

Figura 31. Submenú nuevo 107

Figura 32. Ventana de condiciones iniciales (polarización potencióstática) 108

Figura 33. Submenú abrir 108

Figura 34. Ventana abrir 109

Figura 35. Ventana desplegada de un archivo existente	109
Figura 36. Ventana de contraseña	109
Figura 37. Submenú guardar	110
Figura 38. Ventana guardar	110
Figura 39. Submenú imprimir	111
Figura 40. Ventana de impresión	111
Figura 41. Submenú salir	111
Figura 42. Opción purgado del submenú resultados	112
Figura 43. Ventana de resultados del purgado	112
Figura 44. Opción polarización del submenú resultados	113
Figura 45. Ventana de resultados de la polarización	113
Figura 46. Opción de purgado del submenú gráficas	114
Figura 47. Opción de polarización del submenú gráficas	114
Figura 48. Submenú correr	115
Figura 49. Ventana inicio de la prueba	115
Figura 50. Barra de tiempo del purgado	115
Figura 51. Submenú abortar	115
Figura 52. Ventana de confirmación	116
Figura 53. Submenú celda	116
Figura 54. Ventana características celda	116
Figura 55. Submenú potencioestado	117
Figura 56. Ventana características potencioestado	117

Figura 57. Submenú índice	117
Figura 58. Ventana de ayuda general	118
Figura 59. Submenú Acerca De	118
Figura 60. Ventana Acerca De	118
Figura 61. Diagrama de flujo	133

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Circuitos impresos

Anexo B. Guía de conexiones

Anexo C. Papers

Anexo D. Especificaciones de los electrodos

Anexo E. PIC16F877

Anexo F. DAC714P

Anexo G. ADS7813

Anexo H. INA128

Anexo I. MAX232

Anexo J. TL082

Anexo K. DC4051

Anexo L. LM78XX

Anexo M. LM79XX

Anexo N. Normas ASTM

Anexo O. Manual del usuario y de mantenimiento

GLOSARIO

ACTIVA: dirección negativa del potencial de electrodo.

ADC: dispositivo que convierte un dato análogo en un dato digital. Mapea una tensión análoga en un código digital de "n" bits.

AMPERÍMETRO DE RESISTENCIA CERO (ZRA): es utilizado para monitorear el flujo de corriente en un circuito o entre dos electrodos sin causar una caída iR . Es a menudo usado como un seguidor de corriente en los potenciostatos modernos.

AMPLIFICADOR: circuito que puede aumentar la excursión pico a pico de la tensión, la corriente o la potencia de una señal.

AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTACIÓN: amplificador diferencial con alta impedancia de entrada y alto CMRR.

AMPLIFICADOR OPERACIONAL: amplificador de continua de alta ganancia de tensión utilizable para frecuencias de cero a un poco más de 2 MHz.

ANIÓN: ión cargado negativamente.

ÁNODO: electrodo de una celda electrolítica en el cual la oxidación es la principal reacción.

BUFFER: dispositivo por lo general un transistor que aumenta la máxima corriente de carga permisible en un amplificador operacional.

CAÍDA iR : caída de voltaje debido a los efectos de la resistencia de la solución en las celdas electroquímicas. Puede ser necesario compensar éste efecto cuando se analizan curvas de polarización a altas densidades de corriente.

CAPILAR O TUBO DE LUGGIN: compartimiento lleno de una solución conductora que provee un óptimo posicionamiento del E.R.

CATIÓN: ión cargado positivamente.

CÁTODO: electrodo de una celda electrolítica en el cual la reducción es la principal reacción.

CELDA ELECTROQUÍMICA: sistema electroquímico que consiste de un ánodo y un cátodo en contacto metálico y sumergidos en un electrolito. Es un accesorio del potenciostato, que cumple con la función de modelar un medio de trabajo.

CIRCUITO EXTERNO: cables, conectores, dispositivos de medida, fuentes de corriente, etc., que son usados para ocasionar o medir las condiciones eléctricas deseadas dentro de la celda de prueba.

COMUNICACIÓN ASINCRONA: comunicación en la cual un bit identifica su bit de comienzo y 1 o 2 bits identifican su final, no es necesario ningún carácter de sincronismo. Los bits de datos son enviados al receptor después del bit de start. El bit de menos peso es transmitido primero.

COMUNICACIÓN SERIAL: es un modo de transmisión de datos en el cual los bits de un carácter de datos se transmiten en forma secuencial sobre un solo canal. La comunicación serial puede ser síncrona o asíncrona.

COMUNICACIÓN SÍNCRONA: los datos son enviados en bloques, el transmisor y el receptor son sincronizados por un o más caracteres especiales llamados caracteres sync.

CONDENSADOR DE DESACOPLO: condensador empleado para conectar un nodo a tierra.

CONSTANTE DE FARADAY (F): es el producto de la constante de Avogadro en nA y la carga elemental e, es igual a 96489 Coulombs/mol (1 coulomb = 1 A*seg).

CONTRALECTRODO O ELECTRODO AUXILIAR: utilizado para transferir corriente hacia o desde un electrodo de prueba; es de material químicamente inerte al medio, como platino, oro o grafito.

CORRIENTE DE CORROSIÓN: velocidad de flujo de carga a través de la interfase del electrodo debido a los procesos de oxidación y reducción metálicos espontáneos. ($i_{\text{corr}} = i_{\text{anódica}} = i_{\text{catódica}}$).

CORRIENTE IMPRESA: corriente eléctrica suministrada por un dispositivo empleando una fuente de poder que es externa al sistema del electrodo.

CORROSIÓN: reacción química o electroquímica entre un material, usualmente un metal, y su medio, que produce el deterioro del primero y sus propiedades.

CORROSIÓN CATÓDICA: corrosión de un metal cuando éste es un cátodo.

CORROSIÓN LOCALIZADA: corrosión en sitios discretos, por ejemplo, corrosión por picadura y corrosión por agrietamiento.

CORROSIÓN POR AGRIETAMIENTO O HENDIDURA: corrosión localizada de una superficie metálica en o inmediatamente adyacente a un área que está protegida de la total exposición al medio debido a la cercana proximidad entre el metal y la superficie de otro metal.

CORROSIÓN POR PICADURA O PITTING: corrosión de una superficie metálica, confinada en un punto o área pequeña, que toma la forma de cavidades. El ataque afecta a zonas de la superficie de 1 ó 2 mm² por cada picadura y se propaga en forma de túnel con bastante rapidez hacia el interior del metal.

CURVAS DE CORROSIÓN: curvas que describen en forma gráfica la velocidad de corrosión de un metal en un medio determinado.

DAC: dispositivo electrónico cuya función es tomar valores numéricos digitales y reproducir la forma de onda continua que representan.

DEACTIVACION: proceso de eliminación previa de los elementos corrosivos activos, normalmente oxígeno, de un líquido corrosivo mediante la corrosión controlada de un metal prescindible o mediante otros medios químicos, de ese modo haciendo el líquido menos corrosivo.

DELPHI: es una potente herramienta de desarrollo de programas que permite la creación de aplicaciones para Windows.

DENSIDAD DE CORRIENTE: corriente eléctrica hacia o desde una unidad de área de una superficie de electrodo.

DENSIDAD DE CORRIENTE ANÓDICA CRÍTICA: máxima densidad de corriente anódica observada en la región activa para un electrodo metálico o aleación, que exhibe un comportamiento activo-pasivo en un medio.

DIAGRAMA DE EVANS: gráfica teórica de E vs i o $\text{Log}(i)$, ilustra las contribuciones de los procesos anódicos y catódicos separadamente.

ELECTRODO: conductor eléctrico a través del cual entra o sale una corriente eléctrica en un medio, ya sea dicho medio una solución electrolítica, un sólido, una masa fundida, un gas ó el vacío.

ELECTRODO DE TRABAJO: electrodo de prueba o muestra en una celda electroquímica.

ELECTRÓLISIS: producción de cambios químicos del electrolito mediante el paso de corriente a través de una celda electroquímica.

INTERFACE: cara visible de los programas. Abarca las pantallas y su diseño, el lenguaje usado, los botones y los mensajes de error, entre otros aspectos de la comunicación computadora/persona.

INTERFASE: lugar de contacto de dos fases no miscibles.

METAL NOBLE: metal con un potencial de electrodo estándar que es más noble (positivo) que el potencial de hidrógeno.

MICROCONTROLADOR: dispositivo programable por el usuario que integra en un pequeño chip, todas las funciones de una computadora: memoria, puertos E/S, comunicaciones, etc.

MULTIPLEXOR: circuito lógico que acepta varias entradas de datos y permite sólo a una de ellas alcanzar la salida. Actúa como un interruptor de posiciones múltiples controlado digitalmente, donde el código digital que se aplica a las entradas de selección controla qué entradas de datos serán trasladadas hacia la salida.

NOBLE: dirección positiva del potencial de electrodo (cada vez más oxidación).

OXIDACIÓN: pérdida de electrones por la constitución de una reacción química.

PASIVACIÓN: proceso en la corrosión metálica mediante el cual los metales se vuelven pasivos. Es la propiedad que presentan determinados metales y aleaciones de permanecer prácticamente inertes en determinados medios, en los que, de acuerdo con la termodinámica, deberían comportarse como metales

activos y por lo tanto disolverse con velocidades altas a través de un mecanismo de corrosión electroquímico.

PASIVO: estado de una superficie metálica caracterizada por bajas velocidades de corrosión en una región de potencial que es de fuerte oxidación para el metal.

PENDIENTE DE TAFEL: pendiente de la porción de línea recta de una curva de polarización, usualmente ocurriendo a más de 50 mV del potencial de circuito abierto, cuando es presentada en una gráfica semilogarítmica en términos de voltaje por ciclo logarítmico de densidad de corriente (comúnmente referida como voltios por década).

POLARIZACIÓN: cambio del potencial de electrodo de circuito abierto como resultado del paso de corriente.

POLARIZACIÓN ANÓDICA: cambio del potencial del electrodo en la dirección noble (positiva) debido al flujo de corriente.

POLARIZACIÓN CATÓDICA: cambio del potencial del electrodo en la dirección activa (negativa) debido al flujo de corriente.

POLARIZACIÓN POTENCIODINÁMICA O POTENCIOCINÉTICA: técnica en la cual se varía el potencial de un electrodo en forma continua a una velocidad preestablecida.

POLARIZACIÓN POTENCIOSTÁTICA: técnica para el mantenimiento de un potencial de electrodo constante.

POTENCIAL DE CIRCUITO ABIERTO: potencial de un electrodo medido con respecto a un electrodo de referencia u otro electrodo, cuando ninguna corriente fluye hacia o desde éste.

POTENCIAL DE CORROSIÓN: potencial de una superficie corroyéndose en un electrolito con relación a un electrodo de referencia medido bajo condiciones de circuito abierto.

POTENCIAL DE ELECTRODO: potencial de un electrodo en un electrolito medido contra un electrodo de referencia.

POTENCIAL DE PASIVACIÓN: potencial correspondiente a la máxima densidad de corriente activa (densidad de corriente anódica crítica) de un electrodo que exhibe un comportamiento de corrosión activo-pasivo.

POTENCIAL DE PICADURA CRÍTICO: menor potencial positivo donde la corrosión por picadura se iniciará y propagará.

POTENCIAL DE PROTECCIÓN: potencial más positivo donde la corrosión por picadura y por agrietamiento no se propagarán.

POTENCIOSTATO: instrumento utilizado para el mantenimiento automático de un electrodo en un electrolito a un potencial constante o potenciales controlados con respecto a un electrodo de referencia adecuado.

PROTECCIÓN ANÓDICA: técnica para reducir la velocidad de corrosión de un metal polarizándolo dentro de su región pasiva donde las velocidades de disolución son bajas.

PROTECCIÓN CATÓDICA: técnica para reducir la velocidad de corrosión de una superficie metálica haciéndola el cátodo de una celda electroquímica.

PROTECCIÓN CONTRA CORTOCIRCUITO: generalmente, significa que la fuente de alimentación tiene alguna forma de limitación de la corriente que evita las corrientes de cargas excesivas si se presenta un cortocircuito en la carga.

PROTOCOLO: procedimientos y formatos comunes que permiten compartir recursos entre computadores. Establecen puentes lógicos entre distintas tecnologías y gobiernan los elementos de comunicación de datos.

REDUCCIÓN: ganancia de electrones por la constitución de una reacción química.

REGIÓN TRANSPASIVA: región de una curva de polarización anódica, positiva y por encima del rango de potencial pasivo, en la cual hay un considerable incremento en la densidad de corriente (incremento de la disolución del metal) cuando el potencial se vuelve más positivo (noble).

RESISTENCIA DE LA SOLUCIÓN (R_s): resistencia efectiva de la solución (a menudo minimiza por el uso de un capilar de Luggin. Las técnicas de interrupción de corriente en los estudios Dc pueden ser usadas para compensar R_s). Las técnicas de impedancia permiten la estimación precisa de este parámetro y las técnicas de compensación no son requeridas normalmente.

RESISTENCIA DE POLARIZACIÓN: pendiente (dE/di) de una curva de potencial (E) contra densidad de corriente (i), en el potencial de corrosión. Es inversamente proporcional a la densidad de corriente de corrosión cuando la técnica de resistencia de polarización es aplicable.

RS-232: conjunto de especificaciones que definen la comunicación serial entre un DTE (equipo terminal de datos, normalmente un ordenador o una terminal) y un DCE (equipo de comunicación de datos, normalmente un modem). El interfaz RS-232 define parámetros de la comunicaciones tales como paridad, número de bits de parada y la baudio-rate.

SOBREVOLTAJE: cambio en el potencial de un electrodo desde su valor de estado de equilibrio cuando es aplicada una corriente.

TIERRA VIRTUAL: cierto tipo de tierra que aparece en la entrada inversora de un amplificador operacional con realimentación negativa. Se llama tierra virtual porque produce algunos, pero no todos, los efectos de una tierra mecánica. Específicamente es tierra para tensión pero no para corriente. Un nodo que sea una tierra virtual tendrá cero voltios con respecto a tierra, pero el nodo no tendrá una trayectoria a tierra para la corriente.

TRANSISTOR DARLINGTON: son dos transistores conectados para obtener un valor β muy grande. El emisor del primer transistor excita la base del segundo transistor.

TRANSPASIVACIÓN: fenómeno que tiene lugar cuando inicialmente a potenciales bajos, la capa pasiva está constituida por productos oxidados de muy baja o nula solubilidad en el medio, son estables; en condiciones más oxidantes, se forman productos de oxidación distintos, que ahora son solubles en el medio.

VARISTOR: dispositivo que actúa como dos diodos zener enfrentados. Se le emplea o conecta entre los terminales del arrollamiento primario de un transformador de potencia para evitar que al equipo le entren picos de la red.

VELOCIDAD DE CORROSIÓN: cantidad de corrosión ocurriendo en una unidad de tiempo.

INTRODUCCIÓN

Los metales a lo largo de la evolución humana han estado ligados al desarrollo y avance cultural. Con las estructuras metálicas nace el incesante afán del hombre para que éstas perduren en el tiempo; paulatinamente se desarrollan diferentes estrategias para retardar el paso de los metales a su estado natural (oxidación), y así preservar y prolongar su vida útil.

Teniendo en cuenta lo anterior, se diseñó este prototipo, el cual tiene un carácter didáctico y educativo, ya que pretende que el estudiante por medio de pruebas de laboratorio establezca condiciones ambientales parecidas a la realidad y así compruebe a través de un proceso simulado que la corrosión está ligada a la presencia de un medio agresivo, a los materiales y sus limitaciones.

El capítulo introductorio trata de los principios y definiciones de la corrosión electroquímica, abarcando los tipos de pruebas que se pueden realizar en base a ellos y las herramientas necesarias para elaborar los ensayos.

En el segundo capítulo, se describe el equipo construido explicándose el diseño de cada una de las etapas que lo componen: fuente de alimentación, tarjeta de control y convertidor de corriente a voltaje.

El tercer capítulo lo constituye la celda electroquímica de prueba y todos los elementos necesarios para realizar las prácticas de laboratorio.

El capítulo cuarto contiene el software de control, diseñado para permitir la toma de potencial y barrido de los diferentes datos requeridos para realizar las pruebas. La implementación del software se hizo con la ayuda del programa delphi 5 y sus componentes.

En el capítulo de anexos se encuentran las hojas de especificaciones de los elementos utilizados en el diseño del prototipo (celda y potencióstato); al igual, que las normas que rigen cada una de las pruebas de laboratorio que son realizadas. También está anexo los circuitos impresos, guías de conexiones y un manual de usuario y mantenimiento que tienen las pautas necesarias para cada uno de los ensayos.

1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

1.1 CORROSIÓN ELECTROQUÍMICA

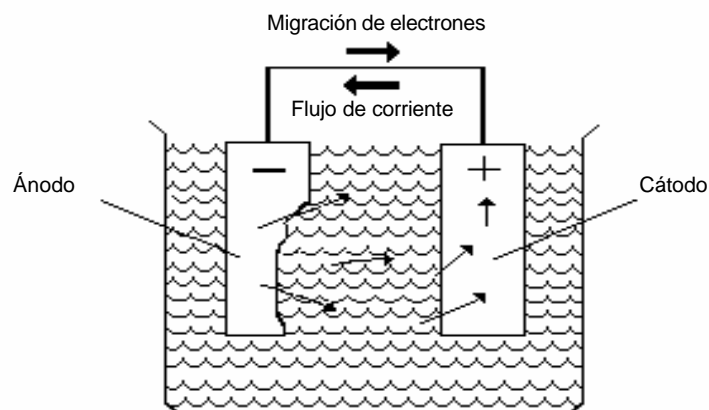
La corrosión electroquímica es un proceso espontáneo que implica la existencia de una zona anódica (donde se da una reacción de oxidación), una zona catódica (donde se dirigen los electrones liberados en la zona anódica) y un electrolito. En la región anódica se produce la corrosión y en la catódica la inmunidad del metal. Este tipo de corrosión tiene lugar a temperaturas moderadas y se da cuando los materiales metálicos se hallan en contacto con medios de conductividad electrolítica, en particular con el agua, soluciones salinas y ácidas, suelos o la humedad de la atmósfera (la cual deber ser del 70%).

La figura 1 ilustra el proceso que ocurre cuando se presenta la corrosión electroquímica. La diferencia de potencial creada entre el ánodo y el cátodo provoca una migración de electrones desde el ánodo al cátodo a lo largo del conductor metálico externo. Cuando la corriente sale del metal anódico, pequeñísimas partículas de metal pasan a la solución donde se combinan con el electrolito para formar el producto de la corrosión (la herrumbre).

La infinidad de burbujas que aparecen sobre la superficie metálica corresponden a la formación de hidrógeno gaseoso, H_2 , poniendo de manifiesto la existencia de

cátodos infinitos, mientras en los ánodos se va disolviendo el metal. Al cambiar continuamente de posición estas zonas anódicas y catódicas, llega un momento en que el metal se disuelve continuamente, casi siempre es más notoria en una zona que en otras, y su forma de manifestarse más característica es la aparición de picaduras.

Figura 1. Dirección del flujo de corriente y electrones en una celda de corrosión



Para que exista la corrosión electroquímica deben cumplirse las siguientes condiciones mínimas:

- Debe haber un ánodo y un cátodo.
- Debe existir un potencial eléctrico entre los dos electrodos (ánodo y cátodo).
- Debe haber un conductor metálico que conecte eléctricamente al ánodo y al cátodo.

- Tanto el ánodo como el cátodo deben estar sumergidos en una solución electrolítica la cual está ionizada.

1.2 PROCESOS FARADAICOS

En los electrodos se pueden presentar dos tipos de procesos. En uno de ellos, conocido como procesos faradaicos, se transfieren cargas a través de la interfase metal-solución provocando una reacción de oxidación o reducción, las cuales están gobernadas por la ley de Faraday: *la cantidad de reacción química ocasionada por el flujo de corriente, es proporcional a la cantidad de electricidad dada*. Los electrodos en que ocurren procesos faradaicos se conocen como electrodos de transferencia de carga. Bajo estas condiciones una interfase metal-solución mostrará un rango de potenciales donde no ocurren transferencias de carga porque tales reacciones son desfavorables cinética o termodinámicamente.

Un electrodo en el cual no se presenta transferencia de carga a través de la interfase metal-solución sin considerar el potencial impuesto por una fuente de voltaje externa se llama electrodo ideal polarizado (IPE).

1.2.1 Teoría de la doble capa. Cuando un metal se sumerge en un electrolito, se produce una distribución de cargas que puede ser atribuida a diferentes mecanismos: orientación de dipolos en la interfase metal-solución, transferencia de carga a través de la interfase o absorción de iones en la interfase.

En el caso de las celdas electroquímicas, el mecanismo que tiene lugar preferentemente es la transferencia de carga. En la interfase metal-solución se forman dos capas cargadas con signo opuesto que se mantienen a una cierta distancia una de otra y juntas forman lo que se denomina la doble capa. Esta es la causa por la que se crea una diferencia de potencial en la interfase.

Como puede verse en la figura 2, la doble capa es representada por **Helmholtz** como las placas paralelas de un condensador. Posteriormente se demostró que se ajusta más a la realidad la existencia de una capa difusa, ya que existe un cierto movimiento de iones producido por la diferencia de presión osmótica entre la zona próxima al metal y la zona del interior de la solución.

1.2.2 Capacitancia y carga del electrodo. Debido a que la carga no puede atravesar la interfase IPE cuando se cambia el potencial a través de él, el comportamiento de la interfase metal-solución es análoga a la de un capacitor:

$$C = q/E \quad (1)$$

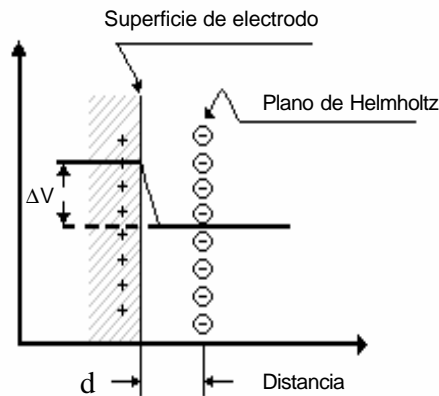
donde,

C: capacitancia, en faradios (F),

q: carga del capacitor, en coulombs (C),

E: potencial a través del capacitor, en voltios (V).

Figura 2. Esquema de la doble capa según Helmholtz



A un potencial dado existirá una carga en el electrodo del metal, q_M , y una carga en la solución, q_S . La carga del metal es negativa o positiva con respecto a la solución, dependiendo del potencial a través de la interfase y de la composición de la solución. Siempre $q_M = -q_S$. La carga en el metal, q_M , representa un exceso o una deficiencia de electrones y reside en una capa muy delgada ($<0.1 \text{ \AA}$) en la superficie del metal. La carga en la solución, q_S , está hecha de un exceso ya sea de cationes o aniones en la vecindad de la superficie del electrodo. Las cargas q_M y q_S , a menudo están divididas por el área del electrodo y expresadas como densidades de carga, $s_M = q_M/A$, usualmente dada en $\mu\text{C}/\text{cm}^2$. El arreglo completo de especies cargadas y dipolos orientados existentes en la interfase metal-solución es llamado doble capa eléctrica. A un potencial dado la interfase metal-solución está caracterizada por una capacitancia de doble capa, C_d , típicamente en el rango de 10 a 40 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$, sin embargo, a diferencia de los capacitores

reales, cuyas capacitancias son independientes de los voltajes a través de ellos, C_d , es frecuentemente una función del potencial.

1.3 POTENCIAL DE CORROSIÓN

Cuando un metal se sumerge en una solución dada, ocurre una reacción electroquímica característica de la interfase metal-solución, provocando que éste se corra. Normalmente el espécimen se oxida (corroe) y el medio se reduce. El espécimen debe funcionar como cátodo y ánodo, y las corrientes anódica y catódica ocurren en la superficie de la muestra. Estas reacciones crean un potencial electroquímico, llamado potencial de corrosión o potencial de circuito abierto en la interfase metal-solución, característico de cada sistema.

1.3.1 Medición del potencial de corrosión. El potencial de corrosión, E_{corr} , de la interfase metal-solución no se puede medir directamente, es por esto que se utiliza como patrón un electrodo cuyo potencial sea fácilmente reproducible. Ya que todos los dispositivos medidores de voltaje miden una diferencia de potencial, E_{corr} sólo puede compararse contra el potencial de un electrodo de referencia, E_{ref} , conocido y medirse indirectamente. Por lo tanto, la medición es de un E_{corr} vs E_{ref} en cualquier sistema metal-solución.

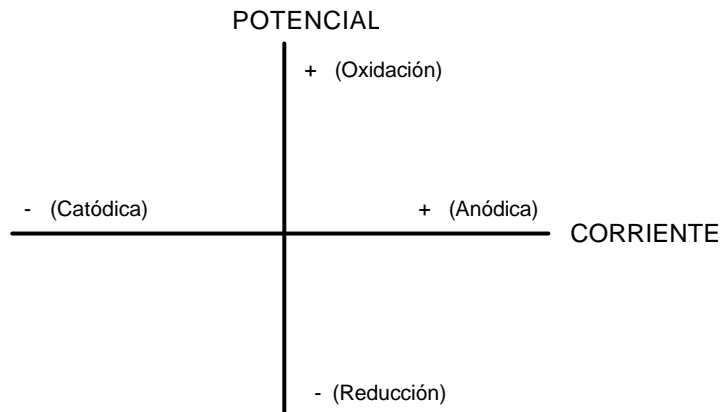
1.4 POTENCIAL Y CORRIENTE

Todos los experimentos de corrosión se basan en la medición y/o control del potencial y la corriente.

El potencial puede ser producto de la reacción natural entre el metal y la solución, así como cuando se trata de medir el E_{corr} , o puede imponerse en el metal por algún instrumento externo. Cuando un instrumento genera un voltaje para variar el potencial de corrosión natural de un metal, realiza el trabajo de estimular ya sea una reacción de oxidación o de reducción, perturbando el balance de electrones que normalmente existe a un E_{corr} . Se dice que un electrodo está polarizado cuando se mantiene a un potencial diferente a E_{corr} por un instrumento externo.

La convención de la polaridad del potencial de corrosión se muestra en la figura 3. Un potencial positivo de E_{corr} acelera la reacción de oxidación. La corriente resultante de la oxidación se llama corriente anódica y tiene polaridad positiva (+). El potencial negativo de E_{corr} acelera la reacción de reducción. La corriente resultante se conoce como corriente catódica, con polaridad negativa (-).

Figura 3. Convenciones de polaridad para graficar curvas de potencial vs. corriente



1.5 TÉCNICAS ELECTROQUÍMICAS PARA LA EVALUACIÓN DE LA CORROSIÓN

Las técnicas electroquímicas permiten realizar evaluaciones en tiempo real (mediciones instantáneas), son más rápidas que las técnicas anteriormente empleadas como el uso de cupones ó testigos a los cuales se les determina el peso perdido después de un periodo de exposición ó como el empleo de mediciones de resistencia eléctrica que no consideran las contribuciones electroquímicas a la impedancia total involucrada. Son efectivas ya que además proporcionan información relacionada con la morfología del ataque ó deterioro de una estructura distinguiendo por ejemplo, entre corrosión localizada, corrosión general, corrosión galvánica, etc. que los antiguos métodos no reconocerían.

La medición de las variables corriente y voltaje obtenida por medio de alguna técnica electroquímica puede proporcionar información sobre la velocidad de corrosión, recubrimientos y películas, pasividad, tendencias a picaduras y otros datos importantes. La velocidad de las mediciones electroquímicas es especialmente útil para aquellos metales o aleaciones que son altamente resistentes a la corrosión.

Las técnicas electroquímicas se pueden dividir de dos maneras: técnicas de corriente alterna (c.a) y de corriente directa (c.d). En las técnicas de corriente alterna se tienen la impedancia faradaica, donde al sistema se le suministra una señal de c.a con determinada magnitud y frecuencia; y la técnica de ruido electroquímico que no requiere de una señal externa, sólo se monitorea el potencial y/o corriente del sistema. En las técnicas de c.d la señal externa que se utiliza para la polarización o perturbación del sistema, es de corriente directa, entre ellas se encuentran las técnicas polarización anódica potencioestática y potenciodinámica, polarización cíclica potenciodinámica, extrapolación de Tafel y resistencia de polarización lineal (LPR), las cuales se describen más adelante.

Los métodos electroquímicos que no requieren de una perturbación utilizan el amperímetro de resistencia cero, para el monitoreo de potenciales de corrosión y corriente.

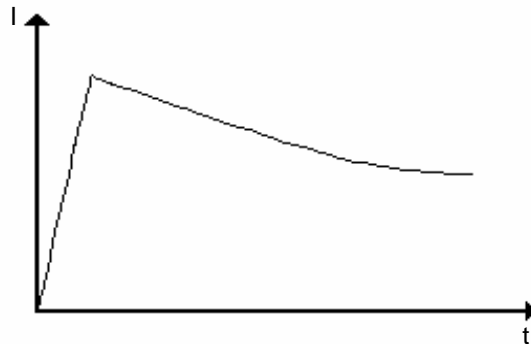
1.5.1 Técnicas potencioestáticas. Esta técnica aplica un potencial constante a la interfase metal-solución y mide su comportamiento electroquímico como una función del tiempo. Los experimentos potencioestáticos se pueden utilizar para determinar los coeficientes de difusión del material disuelto en una solución, para medir potenciales y velocidades de pasivación o repasivación y para evaluar las técnicas de protección anódica o catódica.

Un barrido potencioestático inicia a un potencial programado, y después de un retardo inicial especificado, se pone a un potencial final programado. El potencial que se aplica al final se mantiene para un periodo de tiempo específico. La corriente que fluye como resultado del potencial aplicado se grafica como una función del tiempo (véase figura 4).

La aplicación súbita de un sobrepotencial está ligada a la carga de la doble capa del electrodo de trabajo, por lo que siempre, al inicio de la medición, se debe considerar una corriente capacitiva $i = C_d d\eta/dt$ que se suma a la corriente de la reacción. El tiempo necesario para que ocurra la carga de la doble capa depende de la resistencia del electrolito, R , entre el ET y ER, que en serie con la capacitancia de la doble capa, C_d , proporcionan la constante de tiempo:

$$t_c = RC_d \quad (2)$$

Figura 4. Diagrama de I vs t para un sistema potencioestático



El tiempo necesario para que el sobrepotencial alcance el valor preestablecido depende de τ_c y también del tiempo de respuesta del potencioestato mismo, la corriente disminuye constantemente con el tiempo hasta llegar a un valor estacionario. El ascenso inicial rápido corresponde a la corriente capacitiva. La corriente medida en el potencioestato después de un tiempo finito τ , durante una medición potencioestática anódica, será igual a la que circula por la probeta y se usa como medida de la velocidad de corrosión del espécimen.

El procedimiento estándar utilizado para la aplicación de esta técnica se describe en la norma ASTM G 5-94 (véase anexo N).

1.5.2 Técnica de polarización anódica potenciodinámica. Esta técnica se usa para determinar la característica activa-pasiva de un sistema metal-solución dado. El objetivo principal de estos estudios es el de estimar la resistencia a la corrosión

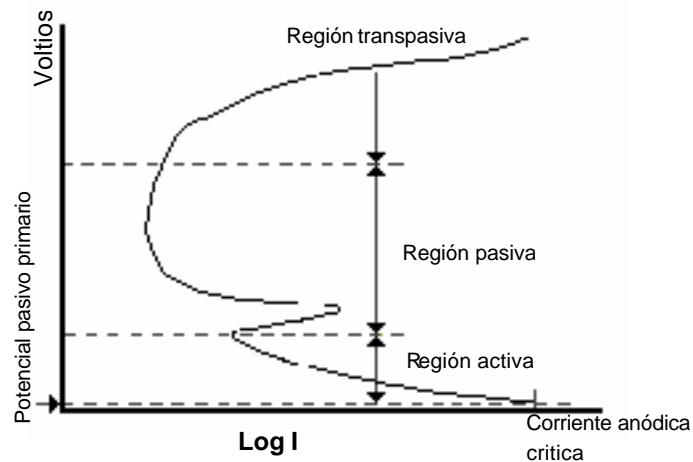
de un metal en cierto medio agresivo, para luego extrapolar la información así ganada a tiempos largos de exposición en ese medio.

La polarización anódica potenciodinámica utiliza un barrido de potencial que típicamente inicia a E_{corr} y se varía en una dirección positiva, normalmente a un potencial positivo suficiente para oxidar la solución de prueba. La velocidad de barrido por lo regular es de 0.1 mV/seg a 5 mV/seg. Los datos más confiables generalmente se adquieren a velocidades de barrido lentas.

En la gráfica se trazan el potencial aplicado contra el logaritmo de la corriente medida. La forma completa de una curva indica el comportamiento de la corrosión del espécimen en la solución de prueba y fácilmente se puede determinar si la muestra se pasivaza completamente. Además, de igual manera se puede determinar si la pasivación es espontánea o si se requiere de una polarización para inducirla.

Los valores de potencial y corriente en puntos críticos en la curva potenciodinámica pueden revelar mucho acerca de las tendencias a la pasivación. Considerando la condición máxima de la transición activo-pasivo de la curva en la figura 5, la corriente anódica crítica que baja en el máximo de esta curva indica que el espécimen se pasiva rápidamente. La proximidad del potencial pasivo primario a E_{corr} indica la tendencia a la pasivación.

Figura 5. Gráfica típica de polarización anódica potenciodinámica



Se puede tasar el grado de pasivación y la estabilidad de la capa pasiva observando la región pasiva de corriente y la región transpasiva del potencial. Corrientes pequeñas en la región pasiva indican un alto grado de pasivación. Una región transpasiva a un potencial más positivo indica que la capa película pasiva tiene mayor estabilidad.

El procedimiento estándar para la aplicación de esta técnica se describe en la norma ASTM G 5-94 (véase anexo N).

1.5.3 Técnica de polarización cíclica. Esta técnica mide las tendencias de picadura (**pitting**) de un espécimen en un sistema metal-solución dado. En un experimento de picaduras, se aplica un barrido de potencial que inicia en E_{corr} y

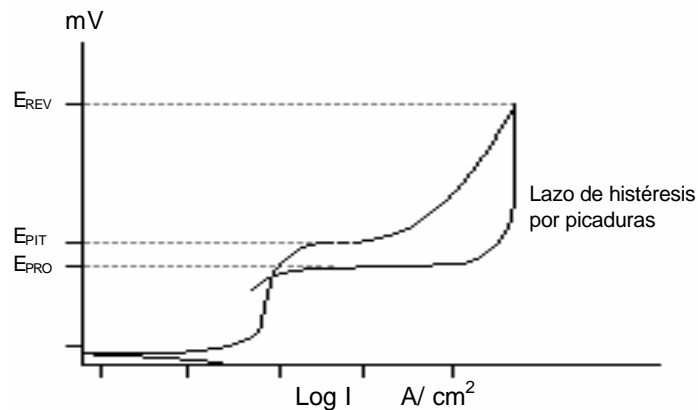
continúa en la dirección positiva (anódica) hasta que ocurre un incremento grande en la corriente. Cuando el barrido alcanza un valor de densidad de corriente programado por el usuario, se invierte y se inicia el barrido en dirección negativa (catódica). El umbral de densidad de corriente es típicamente 1 mA/cm^2 . El potencial final del barrido debe ser negativo con respecto al potencial de protección, E_{pp} , como se determinó por un barrido preliminar. En la gráfica resultante se traza el potencial aplicado vs. el logaritmo de la corriente medida.

El potencial al cual la corriente se incrementa repentinamente se define como el potencial de picadura, E_p , como se muestra en la figura 6. Cuando ocurre la picadura en la dirección positiva del barrido, el barrido inverso trazará un lazo de histéresis. El potencial donde se cierra el lazo en el barrido inverso es el potencial de protección o pasivación, E_{pp} . Si no se cierra el lazo, E_{pp} se puede estimar extrapolando el barrido inverso a una corriente de cero. Si el potencial de picadura y el potencial de protección son iguales, existe una pequeña tendencia a picaduras. Si el potencial de protección es más positivo (anódico) que el potencial de picadura, no habrá tendencia a la corrosión. Si el E_{pp} es más negativo que el E_p , se pueden presentar picaduras.

Los experimentos de picaduras se pueden usar para predecir corrosión por hendiduras así como corrosión por picaduras. En general, el potencial de protección es el potencial por debajo del cual no ocurre corrosión por picaduras ni

por hendiduras. El potencial de picadura es el potencial arriba del cual se pueden presentar ambos tipos de corrosión.

Figura 6. Gráfica típica de polarización cíclica



En la norma ASTM G 61-86 se describe el procedimiento estándar para la aplicación de esta técnica (véase anexo N).

1.5.4 Extrapolación de Tafel. Esta técnica se utiliza para medir la corriente de corrosión, i_{corr} , de tal forma que se pueda calcular la velocidad de corrosión. Una curva de Tafel puede proporcionar directamente la i_{corr} o las pendientes de Tafel (b_a y b_c). Las pendientes de Tafel son empleadas con el valor de R_p (resistencia de polarización) para calcular la i_{corr} .

Se puede generar una curva de polarización iniciando el barrido al E_{corr} y variándolo ya sea a -250 mV vs. E_{corr} (para una curva de Tafel catódica) ó +250

mV vs. E_{corr} (para una curva de Tafel anódica). Es posible obtener ambas curvas de Tafel en sólo un barrido alrededor de ± 250 mV vs. E_{corr} . Cuando se hace esto, existe el peligro de que la porción negativa del barrido altere la superficie del especimen y así cambie sus características durante la porción positiva del barrido. La velocidad de barrido es típicamente 0.1 mV/seg. La curva resultante es una gráfica del potencial aplicado vs. el logaritmo de la corriente medida (véase figura 7).

Una forma de determinar i_{corr} es trazar una línea recta a lo largo de la porción lineal de la curva anódica o catódica y extrapolarlas a través de E_{corr} . Bajo condiciones ideales, la curva de Tafel debe ser lineal sobre algún rango de potenciales. Para la curva catódica, esto ocurre entre -50 mV y -250 mV vs. E_{corr} . Para una curva anódica, esto ocurre entre $+50$ mV y $+250$ mV vs. E_{corr} . Si se extrapola el mejor ajuste de una línea recta a través de E_{corr} , el punto de intersección en E_{corr} proporciona el valor de i_{corr} . La pendiente de la línea recta que se ajusta a los datos de Tafel se llama pendiente de Tafel (b). Se puede determinar una pendiente de Tafel anódica (b_a) de un ajuste de la región lineal anódica y una pendiente de Tafel catódica (b_c) de un ajuste de la región lineal catódica.

Las curvas de Tafel anódica o catódica están descritas por la ecuación de Tafel:

$$h = \log \frac{i}{i_{corr}} \quad (3)$$

donde,

η : sobrevoltaje, diferencia entre el potencial del especimen y el potencial de corrosión,

b : pendiente de Tafel,

i_{corr} : corriente de corrosión,

i : corriente de sobrevoltaje.

Reacomodando la ecuación anterior se obtiene:

$$h = b \log i - \log i_{corr} \quad (4)$$

Esta ecuación tiene la forma $y = mx + b$, tal que una gráfica η vs. $\log i$ es una línea recta con pendiente b . De la ecuación (3) se puede notar que cuando $\eta=0$ (E_{corr}), $\log(i/i_{corr}) = 0$, es decir, que $i/i_{corr} = 1$, y por lo tanto $i = i_{corr}$.

Las pendientes de Tafel, designadas b_a y b_c , deben calcularse para las porciones anódica y catódica de la curva de Tafel respectivamente. La unidad de las pendientes de Tafel puede ser mV/década o V/década (una década de corriente es de un orden de magnitud). Un cálculo de la constante de Tafel se ilustra en la figura 7.

La velocidad de corrosión puede calcularse mediante:

$$\text{Velocidad de corrosión (mpy)} = 0.13 \times i_{\text{corr}} \times \frac{P.E.}{d} \quad (5)$$

donde,

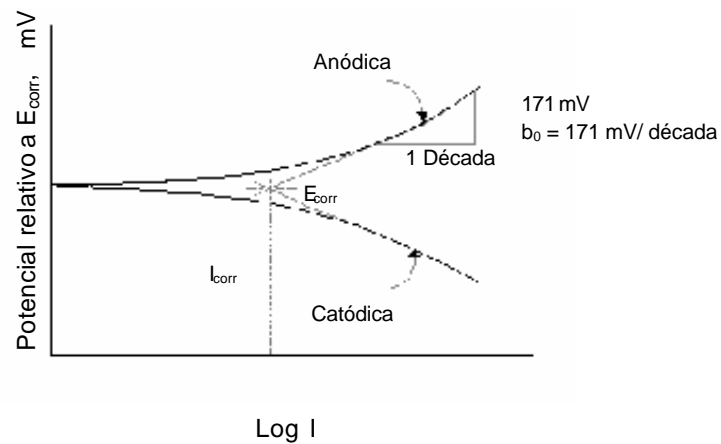
mpy: milipulgadas por año,

$P.E.$: peso equivalente del especimen, en gramos,

d : densidad del especimen, en gramos/cm³,

i_{corr} : densidad de corriente de corrosión, en A/cm².

Figura 7. Gráfica experimental de Tafel



Se puede obtener una mejor precisión en la medición de i_{corr} , cumpliendo las siguientes tres condiciones: hacer mediciones separadas para determinar b_a , b_c , y valores de R_p , usar un nuevo especimen y renovar la solución para cada medición y emplear las ecuaciones para el experimento de la resistencia de polarización.

1.5.5 Resistencia de polarización lineal. Esta técnica se utiliza para medir la resistencia de polarización, R_p , la cual se define como la oposición de un especimen a la oxidación durante la aplicación de un potencial externo. La velocidad de corrosión está relacionada directamente con la R_p y se puede calcular de ella.

En un experimento de resistencia de polarización, se obtienen los datos variando el rango de ± 20 mV alrededor de E_{corr} . Un barrido típico inicia a -20 mV vs. E_{corr} y termina a $+20$ mV vs. E_{corr} ; generalmente se utiliza una velocidad de barrido de 0.1 mV/seg. Se grafica el potencial aplicado vs. la corriente medida.

La aplicación más útil de la medición de R_p está en el cálculo de la velocidad de corrosión. La R_p se determina calculando la pendiente de la región lineal de la curva, figura 8. Se puede observar que la pendiente tiene unidades de resistencia, por ello el nombre de resistencia de polarización.

Para calcular la velocidad de corrosión, primero se debe obtener la corriente de corrosión, i_{corr} . Para determinar esta corriente, se necesitan las pendientes de Tafel. Éstas se pueden obtener de una ejecución previa de la curva de Tafel o se pueden utilizar valores estimados o conocidos. La siguiente fórmula muestra la relación entre el valor de R_p , las pendientes de Tafel, y la velocidad de corrosión:

$$R_p = \frac{\Delta E}{\Delta i} = \frac{b_a b_c}{2.303 i_{corr} (b_a + b_c)} \quad (6)$$

donde,

$R_p = \Delta E / \Delta I$, pendiente de la región lineal ,

ΔE en voltios (V),

ΔI en microamperios (μA),

b_a : pendiente de Tafel anódica (V/década),

b_c : pendiente de Tafel catódica (V/década),

2.303, es el logaritmo natural de diez,

i_{corr} : corriente de corrosión (μA).

De la ecuación (6), se puede derivar la ecuación necesaria para calcular la corriente de corrosión:

$$i_{corr} = \frac{b_a b_c}{2.303 R_p (b_a + b_c)} \quad \text{o} \quad i_{corr} = \frac{b}{R_p} \quad (7)$$

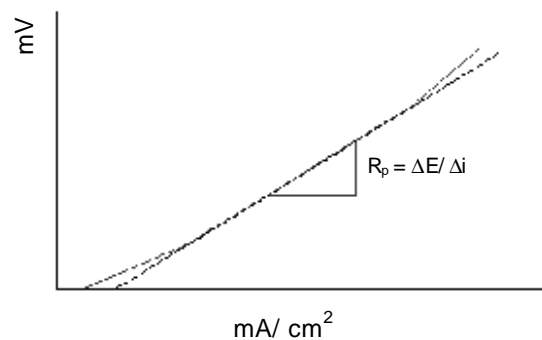
donde,

$$b = \frac{b_a b_c}{2.303 (b_a + b_c)} \quad (8)$$

Una vez que se determina la i_{corr} , la velocidad de corrosión se puede calcular de la ecuación (5).

El valor de R_p puede ayudar a evaluar la habilidad relativa de un material para resistir la corrosión. Puesto que la R_p es inversamente proporcional a la velocidad de corrosión, es fácil clasificar un número de materiales de acuerdo a sus valores de R_p . Asumiendo que todas las muestras tienen la misma área de superficie, los materiales con la R_p más alta, presentan la más alta resistencia a la corrosión.

Figura 8. Gráfica típica de la resistencia de polarización



Existen dos ventajas de la técnica de resistencia de polarización sobre la técnica de extrapolación de Tafel: primero, la medición de R_p se hace en un tiempo mucho más pequeño, y segundo, la técnica R_p expone al espécimen a voltajes más pequeños, y así no se cambia significativamente la superficie del espécimen.

La norma ASTM G 59-91 describe el procedimiento estándar para la aplicación de esta técnica (véase anexo N).

1.6 CELDA ELECTROQUÍMICA

Es un sistema electroquímico que consiste de un ánodo y un cátodo en contacto metálico sumergidos en un electrolito; tiene como función simular el medio de trabajo.

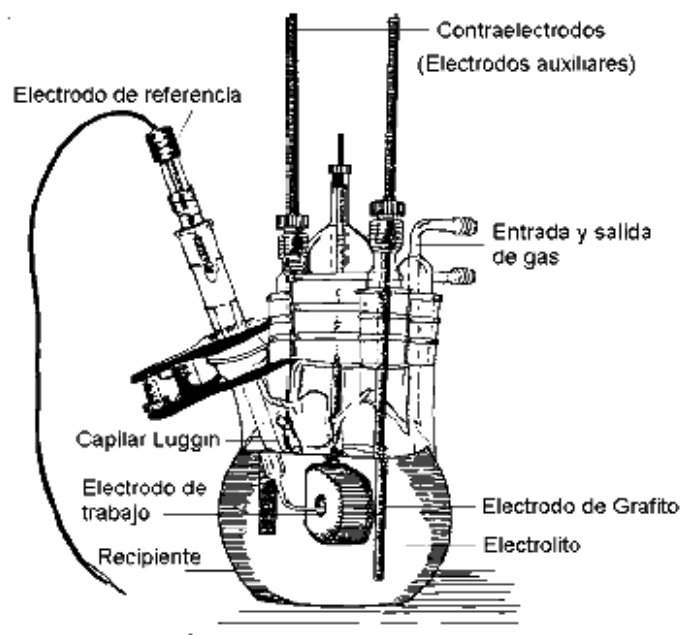
La figura 9 representa la celda de prueba típica utilizada en una medición de corrosión electroquímica, comúnmente llamada matraz de cinco bocas, que incluye: el metal de prueba conocido como electrodo de trabajo (ET), la solución en la cual se va a analizar el espécimen, el electrodo de referencia (ER), conectado a la solución a través del capilar de **Luggin**, y finalmente se utiliza un contraelectrodo o electrodo auxiliar (EA) para proveer la corriente que fluye a través del ET durante la prueba.

1.6.1 Diseño de la celda. La mayoría de los estudios de análisis transitorio utilizan una celda de tres electrodos. Se han realizado algunos criterios de diseño importantes para optimizar el funcionamiento de la celda por la ubicación relativa de los electrodos de trabajo, auxiliar y referencia.

La ubicación del electrodo de trabajo y el contraelectrodo está determinada por tres factores: 1) la necesidad de establecer un campo eléctrico simétrico en el electrodo de trabajo; 2) la resistencia de la celda debe permanecer tan baja como sea posible, particularmente con soluciones de baja conductancia o cuando se

usan altas corrientes, una resistencia baja de la celda asegura que la caída de voltaje a través de la celda, o la pérdida de potencia, no excederá la capacidad del circuito controlador; y 3) para evitar la contaminación de la solución en la vecindad del electrodo de trabajo por productos de las reacciones que toman lugar en el contraelectrodo.

Figura 9. Celda de prueba de corrosión electroquímica típica



El primer requerimiento se satisface con el uso de un arreglo cilíndrico concéntrico del ET y EA, con el extremo del ET aislado de la solución por un material aislante. Alternativamente, un ET plano tal como un disco rotatorio, también es satisfactorio si el contraelectrodo se coloca simétricamente bajo la superficie o a una distancia suficientemente grande de él, de tal forma que el campo eléctrico sea

efectivamente normal a la superficie en todos los puntos. La resistencia de la celda se puede reducir con el uso de una concentración alta de gas inerte, o poniendo el ET y EA tan cercanos como sea posible. La contaminación del ambiente del electrodo de trabajo por productos formados en el EA se puede evitar colocando a este último en un compartimiento separado, el cual se llena con gas inerte.

El ER usualmente se coloca dentro de un capilar de **Luggin** el cual lo conecta al ET para minimizar la caída de potencial iR entre el especimen y el punto de sensado. Si se usa un capilar de referencia con una punta de diámetro d , se puede colocar tan cerca como una distancia $2d$ de la superficie del ET sin provocar un error de aislamiento apreciable. Aislar indica una obstrucción de una parte de la ruta de la corriente de la solución hacia la superficie del ET, que ocasiona densidades de corriente no uniformes para alcanzar a la superficie del electrodo. En todas las celdas electroquímicas existe alguna resistencia entre la punta del electrodo de referencia y el exterior de la doble capa, conocida como resistencia descompensada, R_u . Para un electrodo plano con densidad de corriente uniforme a través de su superficie, la resistencia descompensada se puede calcular por:

$$R_u = \frac{x}{k A} \quad (9)$$

donde,

x : distancia de la punta del capilar al electrodo,

A : área del electrodo,

K : conductividad de la solución.

El efecto de iR_u puede ser particularmente serio para microelectrodos esféricos. Para un electrodo esférico de radio r_o , la resistencia descompensada esta dada por:

$$R_u = \frac{1}{4\rho} \frac{x}{r_o + x} \quad (10)$$

Se puede notar que en este caso la mayoría de las caídas resistivas ocurren cerca del electrodo; así R_u para la punta del ER colocada a un radio del electrodo ($x = r_o$), es la mitad del valor para la punta colocada más allá ($x \gg r_o$). Cualquier resistencia en el ET también aparecerá en R_u .

1.6.2 Modelo electrónico de la celda electroquímica. El circuito equivalente en la figura 10 representa una celda electroquímica conectada a un potencióstato capaz de controlar el potencial entre el ET y ER (E_{ctf}). Conforme la corriente fluye a través de la celda electroquímica, se desarrolla un potencial a través de la resistencia descompensada. El potencial es calculado por:

$$E_{err} = i \times R_u \quad (11)$$

1.6.2.1 Resistencia descompensada. Cuando la resistencia descompensada es alta o la corriente llega a ser muy grande, se puede presentar un potencial de error muy grande, el cual se puede calcular multiplicando la corriente por la resistencia descompensada en el tiempo de la medición. Este error a menudo es llamado

error iR o caída iR . Usando el modelo simple (figura 10), el potencial de control está relacionado con el potencial a través de la doble capa por la siguiente ecuación:

$$E_{ctl} = E_{dl} + E_{err} \quad (12)$$

donde,

E_{dl} : potencial de entre ET y ER,

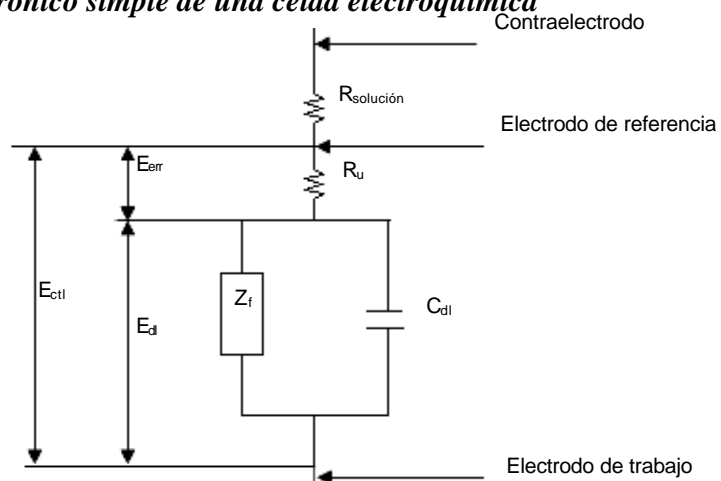
E_{dl} : potencial de la doble capa,

E_{err} : potencial de error.

Los electroquímicos han tratado de desarrollar métodos para eliminar el término E_{err} de la ecuación (12) para producir esta ecuación ideal:

$$E_{ctl} = E_{dl} \quad (13)$$

Figura 10. Modelo electrónico simple de una celda electroquímica



Los métodos más importantes para compensar el error iR se describen a continuación:

- *Diseño de la celda*: un diseño cuidadoso de la celda puede minimizar el valor de R_u y así minimizar E_{err} . Sin embargo, en muchos casos el diseño óptimo de la celda está restringido por otros requerimientos experimentales. En otras ocasiones se requiere de un costo excesivo o de la complejidad del diseño para reducir la resistencia descompensada a un valor despreciable.
- *Corrección después del barrido*: si se mide la R_u antes de que se inicie el barrido, el valor del potencial para cada punto en la gráfica puede ajustarse usando los valores calculados de E_{err} . Esta aproximación tiene dos desventajas. Primero, R_u puede cambiar durante el barrido, ocasionando errores en el cálculo del E_{err} y segundo, ya que la corrección ocurre después del hecho, el barrido no puede alcanzar el potencial final deseado, y la verdadera velocidad de barrido puede variar durante el experimento.
- *Retroalimentación positiva*: al inicio de un experimento, se puede hacer un ajuste de retroalimentación manual o controlado por computadora en el potencióstato. Una vez que se hace el ajuste, el potencióstato automáticamente corregirá el potencial aplicado como es dictado por la medición de corriente. Esta corrección al vuelo es una mejora sobre los

métodos anteriores, ya que se corrigen el valor para el potencial final y la velocidad de barrido. Sin embargo, la corrección se basa en el valor inicial de R_u , el cual puede cambiar durante el experimento. Además esta técnica causa severos problemas de estabilidad cuando trata de hacer la corrección en un sistema de alta velocidad.

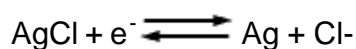
- *Interrupción de corriente:* en muchos casos, esta es la mejor solución para el problema de la R_u . El experimento se interrumpe continuamente por un período de tiempo muy corto (menos de 200 μseg). En cada interrupción, se determina un nuevo valor de E_{err} y así E_{ctl} se corrige, tal que el E_{dl} deseado se mantiene.

1.6.3 Electrodo de referencia (ER). Se utiliza en la medición del potencial del electrodo de trabajo en una celda electroquímica; debe tener un potencial electroquímico estable tan grande que ninguna corriente fluya a través de él. Una de las características principales que debe presentar un electrodo de referencia, es que sea no polarizable (que no presente polarización), es decir, que su potencial no se vea alterado como consecuencia de los cambios en la interfase.

Un electrodo de referencia está constituido por dos sustancias que contienen una misma especie química en dos estados de oxidación diferentes. La elección de ese par de sustancias se hace de tal manera que en la solución en la cual se produce la transferencia de cargas no se modifiquen las concentraciones de las mismas.

El electrodo de referencia universal es el electrodo de hidrógeno. Sin embargo, dadas las dificultades que se presentan en el uso de cualquier electrodo de gas, es necesario el empleo de electrodos de referencia alternativos. Los electrodos de referencia de laboratorio más comunes son el de *calomel saturado* (SCE) y el de *plata/cloruro de plata* (Ag/AgCl).

1.6.3.1 Electrodo de plata/cloruro de plata (Ag/AgCl). Está formado por un hilo de plata sobre el cual se deposita cloruro de plata, generalmente por vía electroquímica, en una solución de NaCl o KCl, en la cual el hilo de plata actúa como ánodo. La reacción del electrodo de plata / cloruro de plata es la siguiente:



y su potencial de equilibrio a 25 °C es:

$$E = 0.2224 - 0.059 \log [\text{Cl}^-]$$

y, su coeficiente de temperatura corresponde a: -0.6 mV/°C. El potencial del electrodo depende muy especialmente de la salinidad de la solución en la cual el electrodo está sumergido.

1.6.4 Electrodo auxiliar o contraelectrodo (EA). Es el utilizado para transferir corriente hacia o desde un electrodo de prueba. Está elaborado de un conductor de material inerte, como platino o grafito y es el encargado de completar el circuito de la celda. El material del contraelectrodo usualmente no participará en la reacción electroquímica o por lo menos, los productos de su reacción no ejercerán influencia en la medida.

1.6.5 Electrodo de trabajo (ET). Es una muestra del material que se va a corroer.

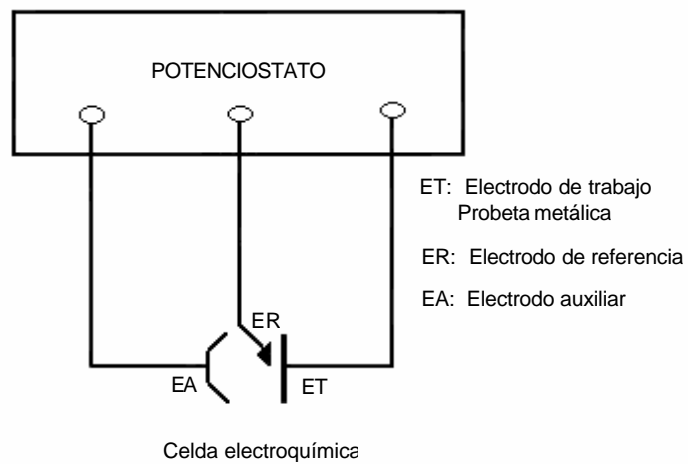
1.7 POTENCIOSTATO

Es un instrumento electrónico que permite imponer a una muestra metálica colocada en una solución electrolítica, un potencial constante o variable, positivo o negativo, con respecto a un electrodo de referencia. El potencióstato implementa este control mediante la inyección de corriente dentro de la celda a través de un tercer electrodo (EA).

El potencióstato tiene dos tareas: medir la diferencia de potencial entre el electrodo de trabajo y el electrodo de referencia sin polarización del electrodo de referencia, y comparar la diferencia de potencial a un voltaje preestablecido y forzar una corriente a través del contraelectrodo hacia el electrodo de trabajo a fin de contrarrestar la diferencia entre el voltaje preestablecido y el potencial existente

del electrodo de trabajo. En casi todas las aplicaciones, el potencióstato mide el flujo de corriente entre el electrodo de trabajo y el auxiliar. La variable controlada en un potencióstato es el potencial de celda y la variable medida es la corriente de celda.

Figura 11. Potencióstato



2. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO CONSTRUÍDO

2.1 ETAPAS DEL POTENCIOSTATO

2.1.1 Fuente de alimentación

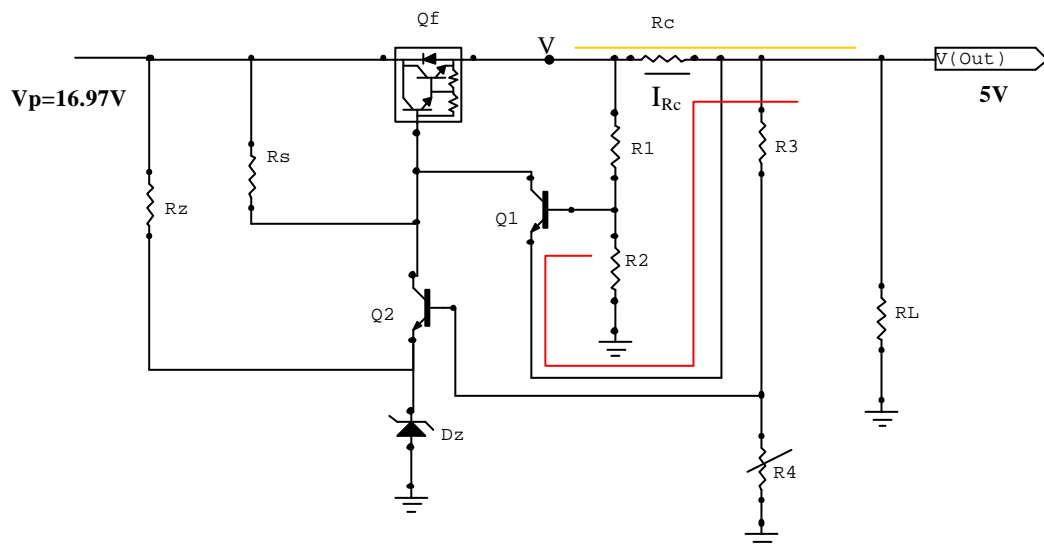
- **Requerimientos de diseño.** La fuente de alimentación debe proporcionar niveles de ± 5 V con una corriente de 700 mA aproximadamente, con el fin de alimentar a la mayoría de los circuitos integrados y generar los voltajes positivos y negativos que se necesitan para las pruebas. Además, debe suministrar voltajes de ± 12 V con una corriente mayor de 100 mA para polarizar el DAC714. Por último, requiere de un bajo rizado para minimizar el ruido en la alimentación de los circuitos.
- **Transformador.** Tomando en cuenta los requerimientos anteriormente descritos, el transformador a utilizar debe tener una capacidad de corriente mayor de 800 mA y poseer mínimo 12 voltios rms en el secundario, con un tab central para la generación de voltajes positivos y negativos. Para esto, se escogió un transformador de **2 A** apto para alimentar todo el circuito, sin incurrir en sobrecarga. Además, se seleccionó con un voltaje rms de **+12 V** y **-12 V** en el secundario, para que al ser rectificado se generen 16.97 V máximo,

los cuales sirven para alimentar los reguladores de voltaje utilizados, sin que se requiera disipar mucha potencia.

- **Puente rectificador.** Debido a que se necesita una rectificación de onda completa, se decidió utilizar un puente rectificador; su único parámetro de selección es que debe soportar más de 800 mA, para el caso se escogió de **8 A**, el cual brinda un mayor margen de seguridad y está disponible comercialmente.
- **Condensadores de filtrado.** Para minimizar al máximo el rizado de la fuente se decidió utilizar para cada salida de voltaje condensadores electrolíticos de elevado valor, en este caso de **4700 mF**, además, se colocaron capacitores cerámicos de **0.1 mF** en paralelo con estos últimos, a fin de reducir el ruido en altas frecuencias.
- **Reguladores de +12 V y -12 V.** Se optó por utilizar reguladores de voltaje de estado sólido para lograr los niveles de ± 12 , ya que la corriente que estos manejan es de hasta 1 A y sólo son necesarios 100 mA para alimentar el DAC714, además, son confiables y de bajo porcentaje de desviación. Los dispositivos que se seleccionaron para tal función fueron el **LM7812** y el **LM7912**, los cuales regulan a +12 V y -12 V, respectivamente.

- **Regulador de -5 V .** Ya que se requiere proporcionar niveles de voltaje negativos, y la corriente que se aplicará al electrodo auxiliar (EA) no supera los 600 mA , se escogió el regulador de estado sólido **LM7905**, el cual soporta corrientes de hasta 1 A , es confiable y simplifica el hardware.
- **Fuente de $+5\text{ V}$.** Como la fuente de $+5\text{ V}$ debe entregar 600 mA para aplicarlos al electrodo auxiliar (EA) y alimentar a todos los integrados utilizados, excepto el DAC714 y la capacidad de corriente del regulador de $+5\text{ V}$ (LM7805) es de 1 A , se decidió diseñar una fuente de **5 V a 2 A** , regulada con un diodo zener y con un transistor que suministrará la corriente necesaria. Además, esta fuente se diseñó con protección contra cortocircuito para evitar que los circuitos integrados sufran algún daño.

Figura 12. Circuito de la fuente de $+5\text{ V}$



Examinando el circuito de la figura 12, se observa que:

1. El voltaje en R_2 es:

$$V_{R2} = \frac{V(R_2)}{R_1 + R_2}, \text{ sea } K = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \Rightarrow V_{R2} = V \times K \Rightarrow V = \frac{V_{R2}}{K} \quad (14)$$

2. Recorriendo la malla en rojo, se tiene:

$$V_{R2} = V_{(BEQ1)} + V_{Sal} \quad (15)$$

3. Recorriendo la malla en amarillo, se obtiene:

$$V = (I_{RC} \times R_C) + V_{Sal} \quad (16)$$

4. Reemplazando (14) en (16):

$$\frac{V_{R2}}{K} = (I_{RC} \times R_C) + V_{Sal} \quad (17)$$

5. Remplazando (15) en (17):

$$\begin{aligned} \frac{V_{(BEQ1)} + V_{Sal}}{K} &= (I_{RC} \times R_C) + V_{Sal} \\ V_{(BEQ1)} + V_{Sal} &= (K \times I_{RC} \times R_C) + (K \times V_{Sal}) \\ V_{(BEQ1)} + V_{Sal} - (K \times V_{Sal}) &= (K \times I_{RC} \times R_C) \\ V_{(BEQ1)} + V_{Sal}(1 - K) &= (K \times I_{RC} \times R_C) \\ I_{RC} &= \frac{V_{(BEQ1)} + V_{Sal}(1 - K)}{K \times R_C} \end{aligned}$$

6. Aproximando el voltaje $V_{(BEQ1)}$ a 0.7 V:

$$I_{Max} = \frac{0.7 + V_{sal}(1 - K)}{K \times R_C} \quad (18)$$

Analizando la ecuación anterior:

✓ La máxima corriente que puede circular por la carga está en función del voltaje de salida.

✓ Cuando la fuente está en cortocircuito $V_{sal} = 0$, por consiguiente la corriente de corto será:

$$I_{Corto} = \frac{V_{(BEQ1)}}{K \times R_C} = \frac{0.7}{K \times R_C}, \text{ que es menor que la corriente de trabajo.}$$

Otra ecuación a considerar es la que relaciona el voltaje en la base de Q_2 , que será:

$$V_{BQ2} = V_{sal} \frac{R_4}{R_3 + R_4}$$

$$V_{sal} = V_{BQ2} \frac{R_3 + R_4}{R_4}$$

$$V_{sal} = V_{BQ2} \times \left(\frac{R_3}{R_4} + 1 \right), \text{ pero } V_{BQ2} = V_Z - V_{BEQ2} = V_Z - 0.7$$

$$V_{sal} = (V_Z - 0.7) \times \left(\frac{R_3}{R_4} + 1 \right), \text{ sea } A = \left(\frac{R_3}{R_4} + 1 \right)$$

$$V_{sal} = (V_Z - 0.7) \times A \quad (19)$$

Donde **A** sería la ganancia de voltaje deseada; la cual representa otra característica importante de esta fuente, al permitir tener una ganancia de voltaje, es decir, que no es necesario seleccionar el zener del valor a que se quiera hacer la regulación sino que se puede poner un valor inferior, y por medio de R_3 o R_4 ajustar la ganancia.

Debido a que se desean obtener 5 V a la salida y es factible seleccionar un zener de valores pequeños (gracias a su buen coeficiente térmico), se empleará el zener de **3.3 V a 1 W**.

Reemplazando $V_{sal} = 5 \text{ V}$ y $V_z = 3.3 \text{ V}$ en la ecuación (19), se tiene que **A = 1.92**.

Además, se sabe que: $A = \left(\frac{R_3}{R_4} + 1 \right)$; para minimizar la impedancia de salida de

la fuente se debe seleccionar R_3 de un valor moderadamente pequeño, en el orden de los ohmios, para el caso se escoge **$R_3 = 330 \Omega$** , y despejando R_4 se tiene entonces que el valor de $R_4 = 359 \Omega$. Pero para evitar errores por no ser un valor comercial se debe colocar un potenciómetro de **5 KW** y se ajusta el valor hasta que la salida del circuito proporcione los 5 V e igualmente se podrá cumplir el objetivo de ajustar la ganancia.

Otro parámetro importante es que el valor de K debe estar entre 0.85 y 0.99 para garantizar mayor estabilidad y realimentación del circuito de protección contra corriente.

Sea **K = 0.9** y como de la ecuación (14) se aprecia que: $K = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$, si se selecciona a **R₂ = 1 KW**, despejando se obtendrá que **R₁ = 100 W**.

De la ecuación obtenida para la corriente máxima dada por:

$$I_{Max} = \frac{0.7 + V_{Sal}(1 - K)}{K \times R_C}, \text{ donde la corriente máxima que se quiere es de 2}$$

amperios, K=0.9 y V_{sal}= 5 V; despejando R_c, se obtiene que R_c= 0.66 Ω, el valor comercial cercano por arriba es de **0.76 W**, lo que limita la máxima

corriente aplicando la formula a $I_{Max} = \frac{0.7 + V_{Sal}(1 - K)}{K \times R_C} = \mathbf{1.8 \text{ A}}$, suficiente para alimentar el circuito.

Se escogió el valor comercial por encima con el fin de no ser capaz de superar los 2 A y de esta manera exigir al transformador más corriente de la que éste puede proporcionar.

La potencia de R_c es: $W_{RC} = (1.8 \text{ A})^2 * 0.76 \Omega = 2.46 \text{ W}$, se selecciona de **5 W**.

R_s se selecciona de tal manera que suministre a Q_2 una pequeña corriente para que éste opere normalmente. Para el caso se decide que esa corriente sea de 3 mA. Como R_s por un lado se encuentra a 16.97 V y en el otro extremo está en la base de Q_f , cuyo voltaje es $5 \text{ V} + V_{(BEQf)} = 5 \text{ V} + 1.4 \text{ V} = 6.4 \text{ V}$, por lo tanto, para que circulen 3 mA, $R_s = 6.4 \text{ V} / 3 \text{ mA} = 2.1 \text{ K}\Omega$; por ello se selecciona de **2.2 KW**. La corriente será de $6.4 \text{ V} / 2.2 \text{ K}\Omega = 2.9 \text{ mA}$.

R_z se debe calcular para proveer al zener de su corriente de trabajo; la cual corresponde a 15 mA; como se encuentran circulando casi 3 mA faltarán 12 mA, por lo tanto, $R_z = (16.97 \text{ V} - 3.3 \text{ V}) / 12 \text{ mA} = 1.1 \text{ K}\Omega$; y se selecciona de **1 KW**.

El transistor Q_f se escoge de tipo darlington para aumentar la impedancia de entrada de la fuente. La máxima corriente que puede circular por éste es $I_{\max} = 1.8 \text{ A}$ y el voltaje que se encuentra es $V_{Qf} = 16.97 \text{ V} - 5 \text{ V} = 11.97 \text{ V}$; de ahí que la potencia que disipa es: $W_{Qf} = 11.97 \text{ V} * 1.8 \text{ A} = \mathbf{21.5 \text{ W}}$, se selecciona el **TIP 141** que es un darlington con un $\beta = 1000$, corriente máxima de 10 A y una potencia de 75 W.

Como la corriente que circula por **Q₁** y **Q₂** es pequeña, y no se encuentra un gran voltaje entre colector y emisor, éstos no consumen casi potencia, de ahí que pueden utilizarse transistores **2N3904**.

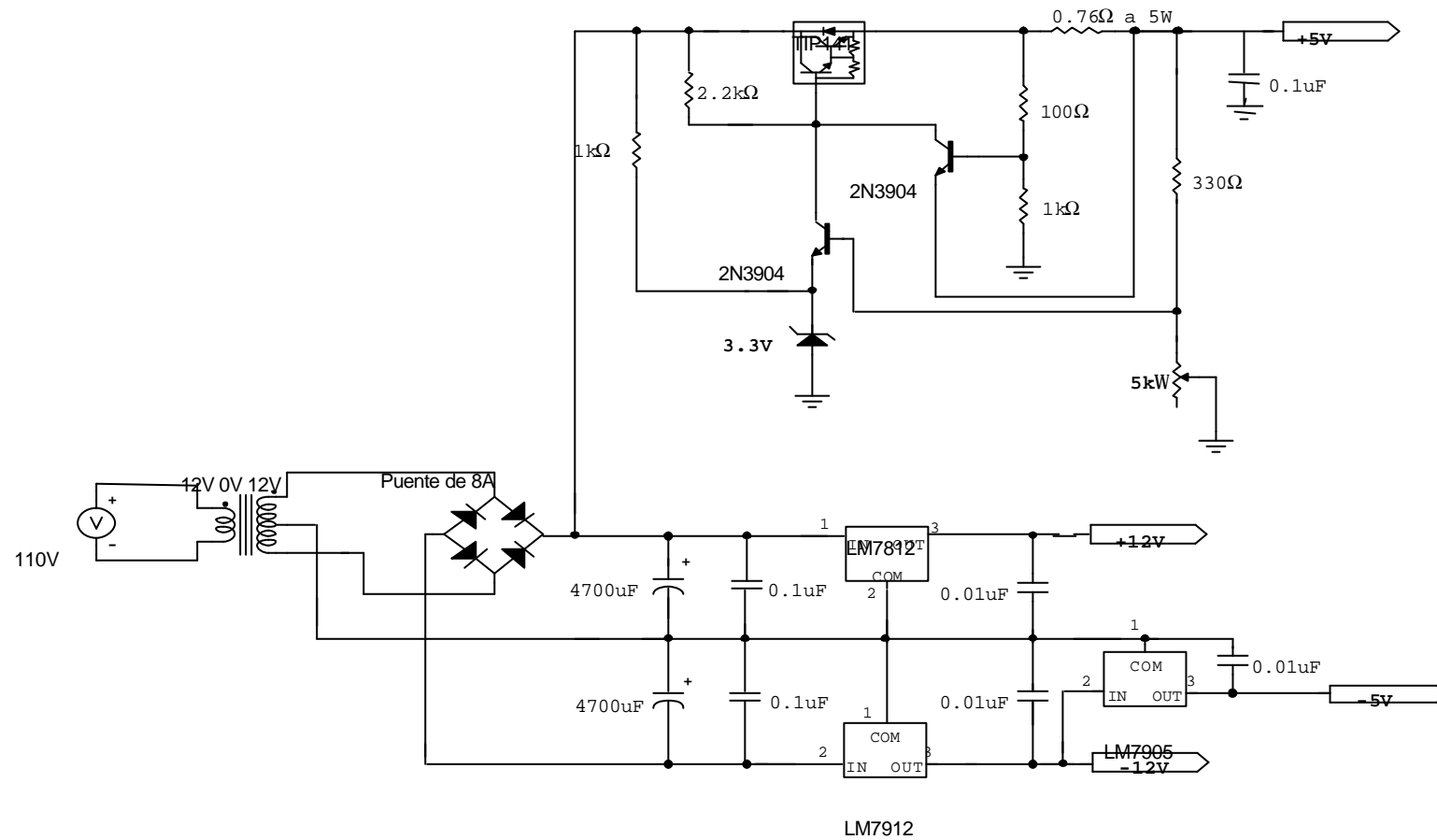
La única resistencia de potencia es **R_C**, por el resto circulan pequeñas corrientes y pueden ser escogidas a ½ **W** teniendo un buen margen de seguridad.

Por último cabe destacar en este diseño que en caso de que se pongan los terminales en cortocircuito la corriente de corto será:

$$I_{Corto} = \frac{V_{(BEQ)}}{K \times R_C} = \frac{0.7}{K \times R_C} = \frac{0.7}{0.9 * 0.76} = \mathbf{0.42 \text{ A}}, \text{ lo cual es inferior a la corriente}$$

máxima y protege el circuito y todos los integrados incluyendo al microcontrolador.

Figura 13. Circuito de la fuente de alimentación



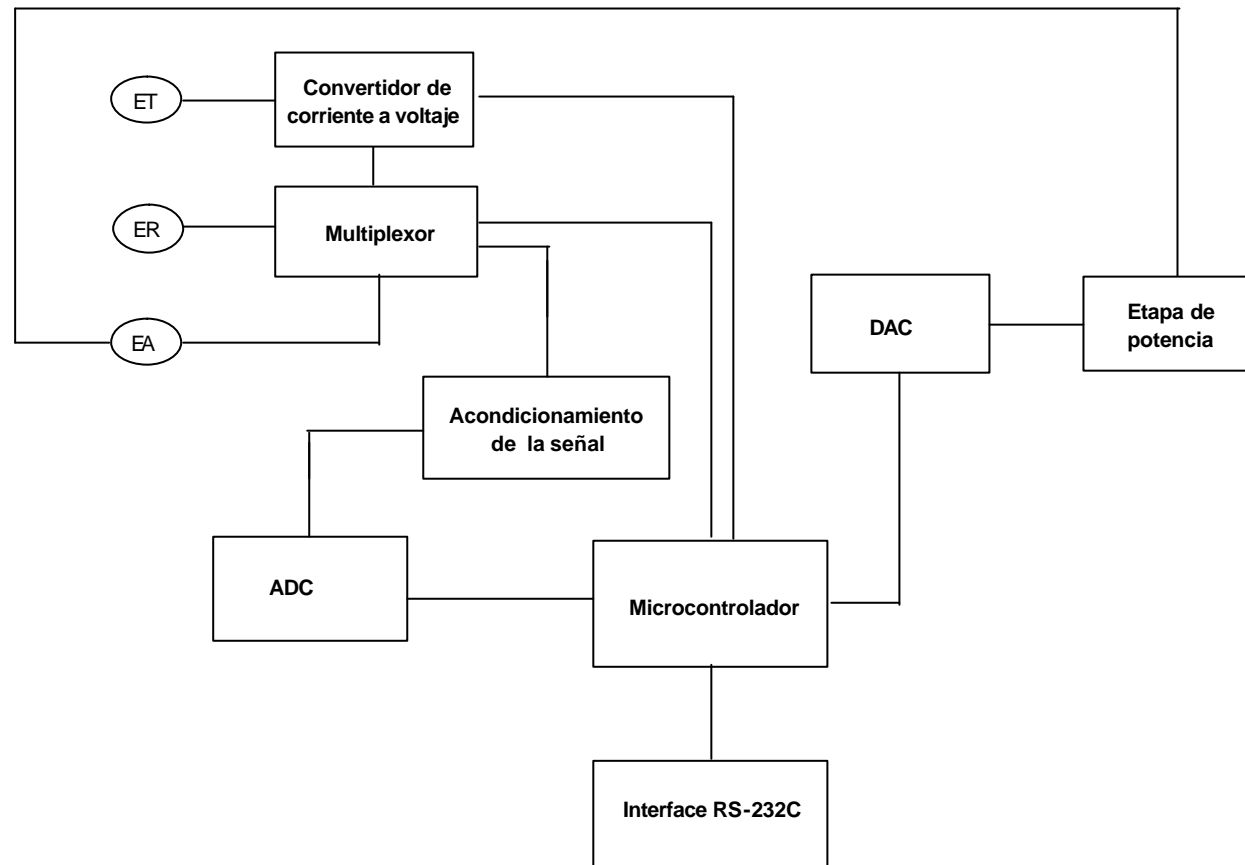
2.1.2 Circuito de control del potencióstato

2.1.2.1 Diagrama de bloques del circuito de control. El diagrama de bloques mostrado en la figura 14 hace referencia al circuito de control del potencióstato.

Básicamente el microcontrolador interviene en los procesos de transmisión y recepción de datos; en el primer caso los datos se envían del PC al DAC y en el segundo del ADC al PC; la comunicación entre el microcontrolador y el computador se establece mediante una interface serial RS-232C. Ya que los datos que se leen provienen de diferentes fuentes (electrodo auxiliar, electrodo de referencia y convertidor I/E), y el conversor ADC es de un solo canal, se hace indispensable la utilización de un multiplexor el cual es controlado por el microcontrolador. En las pruebas electroquímicas se necesita leer la corriente de la celda, y el ADC sólo lee voltaje, por lo tanto, se debe pasar la señal a voltaje utilizando un circuito convertidor, el cual es representado aparte. Antes de llevar la señal al ADC ésta tiene que ser acondicionada con el fin de eliminar ruidos no deseados.

Debido a que la corriente que circula a través del electrodo auxiliar es alrededor de 0.5 A y el operacional que se encuentra a la salida del DAC no maneja este amperaje, se implementó una etapa de potencia con capacidad de alimentar cargas que consumen una alta corriente.

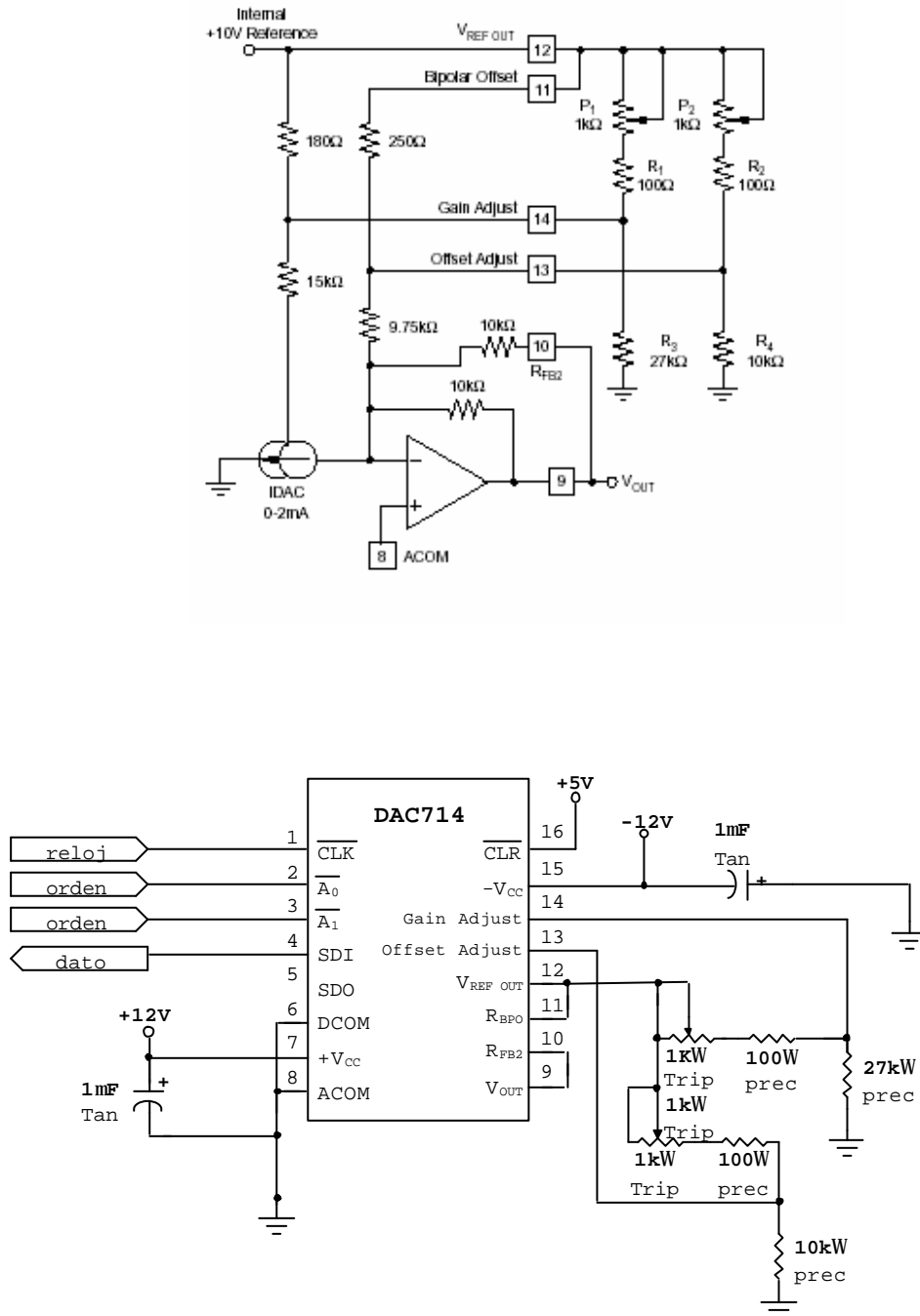
Figura 14. Diagrama de bloques del circuito de control



- **Microcontrolador.** EL microcontrolador seleccionado es el **PIC 16F877**, ya que cumple con los requisitos básicos que se necesitan en el diseño de la tarjeta de control, tales como:
 - ✓ 5 puertos de entrada y /o salida.
 - ✓ Modulo RS-232C.
 - ✓ Interface SPI o sincrónica.
 - ✓ Memoria de datos (RAM) mayor de 368 x 8 bytes.
 - ✓ Memoria de datos (EEPROM) mayor de 256 x 8 bytes.
 - ✓ Memoria de Programa (FLASH) mayor de 8K x 14 palabras.
- **Convertidor DAC.** El convertidor digital a análogo utilizado es el **DAC714**, el cual es de tipo serial síncrono de 16 bits, con una alimentación de ± 12 V a ± 15 V; para esta aplicación se seleccionó un voltaje de ± 12 V.

De acuerdo a la configuración de sus pines el DAC714 puede establecer su rango de salida de datos en forma unipolar de 0 V a 10 V, o bipolar de ± 5 V o ± 10 V. Se seleccionó la de ± 5 V ya que está más cerca del rango de voltajes con que se trabaja (± 2 V). El DAC714 presenta la posibilidad de ajustar el rango de salida, permitiendo manejar el ajuste a cero y la ganancia mediante los potenciómetros P_2 y P_1 , respectivamente (véase figura 15).

Figura 15. Circuitos de ajuste manual de ganancia y offset del DAC714; modo bipolar (rango de salida de -5 V a $+5\text{ V}$)



- **Convertidor ADC.** El circuito integrado **ADS7813** es un convertidor análogo a digital de 16 bits, opera a 5 V y posee un voltaje de referencia interno de +2.5 V. El rango de voltaje de la entrada análoga se establece por la configuración de los pines R1_{IN} (1), R2_{IN} (3), R3_{IN} (4) y BUF (5). La tabla 1 muestra la manera en que deben ser conectados estos pines para seleccionar el rango deseado.

Tabla 1. Rangos de entrada del ADS7813

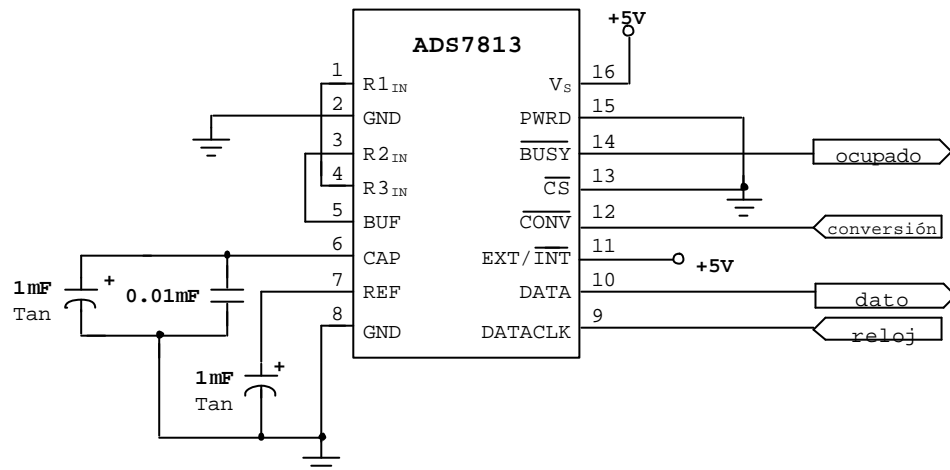
ANALOG INPUT RANGE (V)	CONNECT R1 _{IN} TO	CONNECT R2 _{IN} TO	CONNECT R3 _{IN} TO	INPUT IMPEDANCE (kΩ)
±10V	V _{IN}	BUF	GND	45.7
0.3125V to 2.8125V	V _{IN}	V _{IN}	V _{IN}	> 10,000
±5V	GND	BUF	V _{IN}	26.7
0V to 10V	BUF	GND	V _{IN}	26.7
0V to 4V	BUF	V _{IN}	GND	21.3
±3.33V	V _{IN}	BUF	V _{IN}	21.3
0.5V to 4.5V	GND	V _{IN}	GND	21.3

Ya que el equipo trabaja con un rango de voltaje de ± 2 V, se seleccionó el rango de entrada de voltaje del ADS7813 más cercano a este valor, el cual es de ± 3.33 V, con el fin de obtener la máxima resolución posible, que es:

$$(3.33+3.33) / 65535 = 0.1 \text{ mV.}$$

La transmisión del dato que hace referencia al voltaje de salida está en forma serial sincrónica. Este integrado mediante el pin EXT/INT (11) presenta la opción de configurar el reloj de sincronización de datos interna o externamente; se seleccionó externo para garantizar que sea el microcontrolador quien controle el flujo de datos.

Figura 16. Configuración de pines del ADS7813 para un rango de entrada de ± 3.33 V



- **Acondicionamiento de la señal.** Esta etapa está compuesta por el amplificador operacional **TL082** (formado por un JFET de alta impedancia de entrada y bajo ruido), configurado como seguidor el cual referencia el electrodo de trabajo a una tierra virtual. También hace parte de esta etapa el circuito integrado **INA128**, que es un amplificador de instrumentación para propósitos generales de baja potencia, se caracteriza por tener una impedancia de

entrada elevada ($10^{10}\Omega$), alto CMR (120 dB mínimo) y gran precisión, además, presenta una ganancia de 1 a 10.000 que se puede ajustar mediante la conexión de una resistencia externa, R_G , conectada entre los pines 1 y 8 del integrado (véase tabla 2).

- **Etapas de potencia.** Está formada por una configuración de seguidor de emisor con los transistores **TIP141** y **TIP127** en contrafase, los cuales proporcionan al electrodo auxiliar el mismo voltaje con una mayor capacidad de corriente.

Tabla 2. Valores de ganancia para el INA128

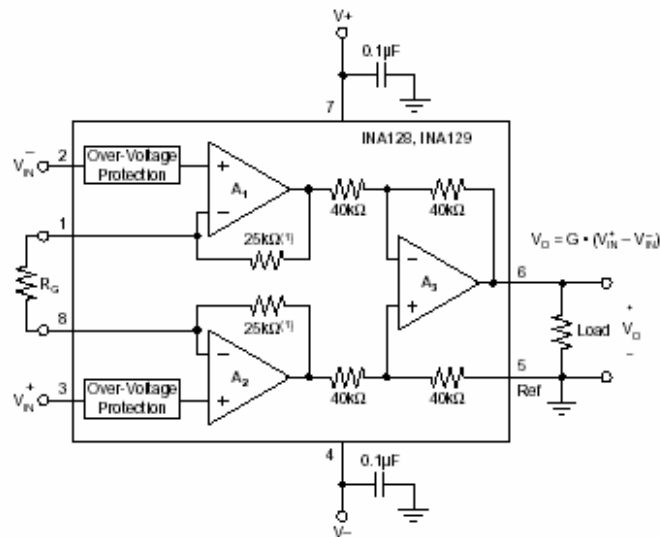
DESIRED GAIN (V/V)	INA128	
	R_G (Ω)	NEAREST 1% R_G (Ω)
1	NC	NC
2	50.00k	49.9k
5	12.50k	12.4k
10	5.556k	5.62k
20	2.632k	2.61k
50	1.02k	1.02k
100	505.1	511
200	251.3	249
500	100.2	100
1000	50.05	49.9
2000	25.01	24.9
5000	10.00	10
10000	5.001	4.99

NC: No Connection.

INA128:

$$G = 1 + \frac{50k\Omega}{R_G}$$

Figura 17. Conexiones básicas del INA128

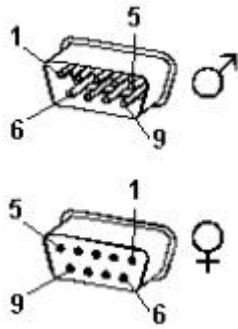


- **Multiplexor.** Se escogió el multiplexor de 8 canales **CD4051**, por medio del cual el microcontrolador selecciona la fuente que se desea leer (EA, ER o salida del convertidor de corriente a voltaje).
- **Interface RS-232.** Esta etapa está constituida por el estándar **RS-232C** y el circuito integrado **MAX232**.

El RS-232C consiste en un conector tipo DB-25 (25 pines), o la versión **DB-9** (9 pines), que será utilizada en el equipo. Las señales con las que trabaja el puerto serie del computador son digitales, de +12 V (0 lógico) y -12 V (1 lógico), para la entrada y salida de datos, y a la inversa en las señales de

control. El estado de reposo en la entrada y salida de datos es -12 V . En la figura 18 se muestra la descripción de pines del conector DB-9 de la interface serial RS-232C.

Figura 18. Descripción de pines del conector DB-9 de la interface serial RS -232C



Pin	Señal	Descripción	E/S
1	CD/DCD	Detección de portadora	E
2	RxD	Recibir datos	
3	TxD	Transmitir datos	S
4	DTR	Terminal de datos listo	S
5	SG	Tierra de señal	—
6	DSR	Equipo de datos listo	E
7	RTS	Solicitud de envío	S
8	CTS	Libre para envío	E
9	RI	Indicador de llamada	E

El circuito integrado MAX232 convierte los niveles RS-232C a voltaje TTL (0 a $+5\text{ V}$) y viceversa, con una alimentación de $+5\text{ V}$. El chip contiene dos drivers TTL - RS-232 y dos RS-232 -TTL y necesita cuatro condensadores externos de $1\mu\text{F}$ para generar el voltaje RS-232 internamente.

Figura 19. Configuración de pines del MAX232

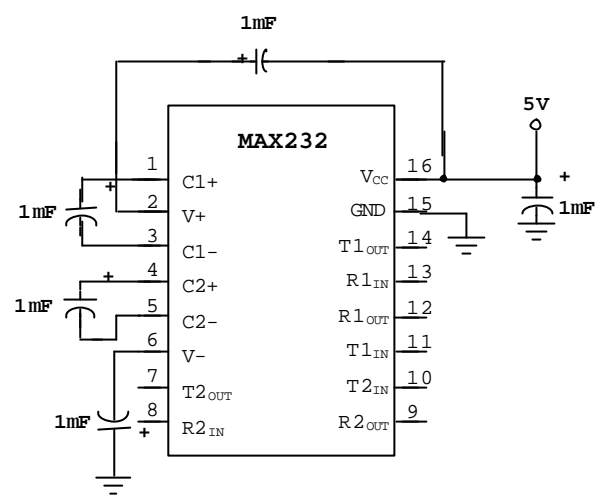
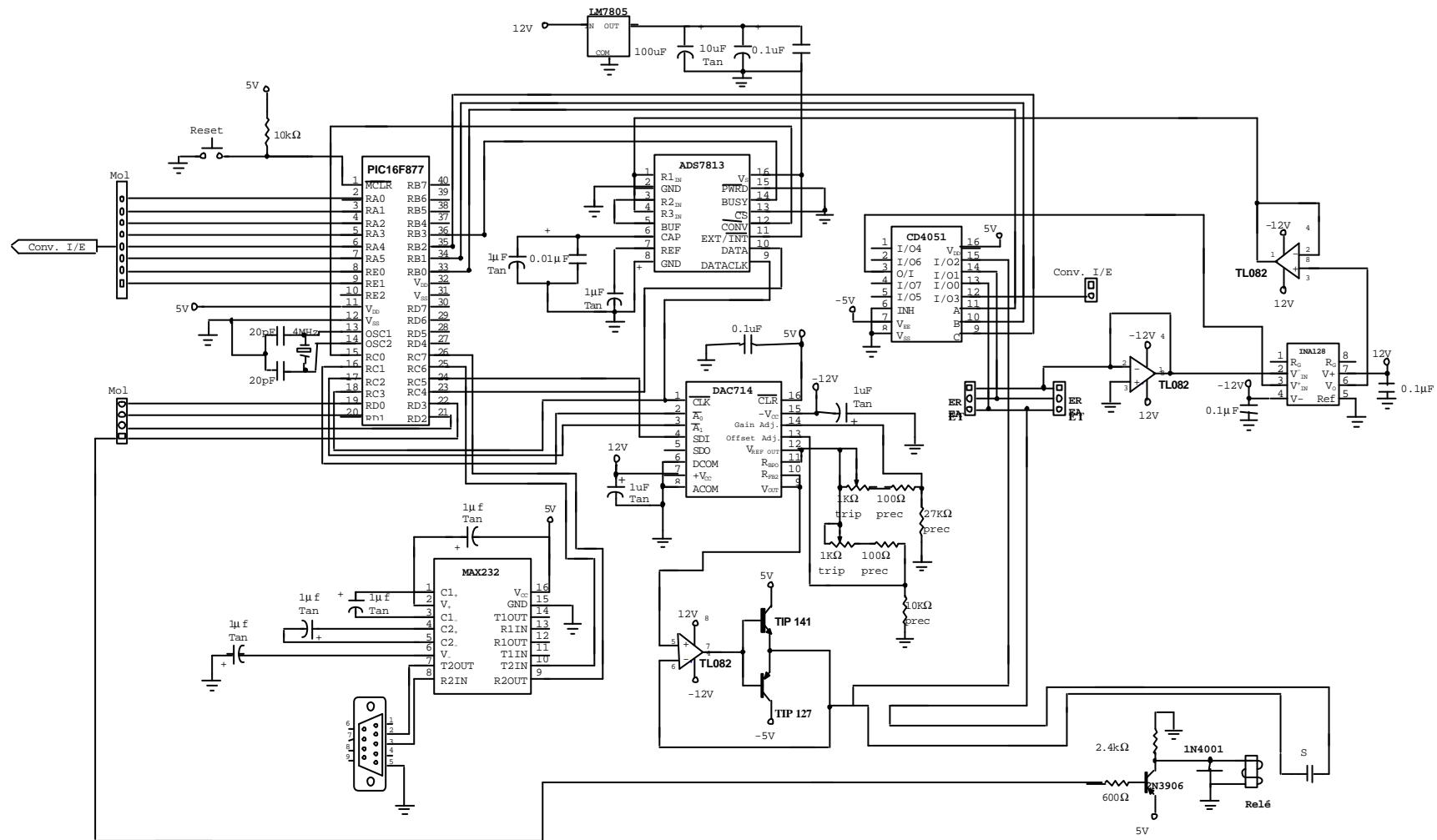


Figura 20. Circuito de control del potencióstato



2.1.3 Circuito convertidor de corriente a voltaje. Se basa en un amplificador operacional **TL082**, configurado como inversor, que se comporta como un convertidor de corriente a tensión.

El circuito está diseñado para medir ocho rangos de corriente; para ello, se dispuso de un arreglo de relés y resistencias (de igual número). Los relés accionados por los transistores **2N3906** que a su vez son excitados por el microcontrolador, seleccionan la resistencia adecuada para el rango de corriente que se desea medir. Las resistencias fueron calculadas utilizando la ecuación 20, considerando el voltaje de salida $V = \pm 1 \text{ V}$ que será suministrado al conversor análogo a digital y asumiendo la corriente. La tabla 3 muestra los rangos de corriente medidos.

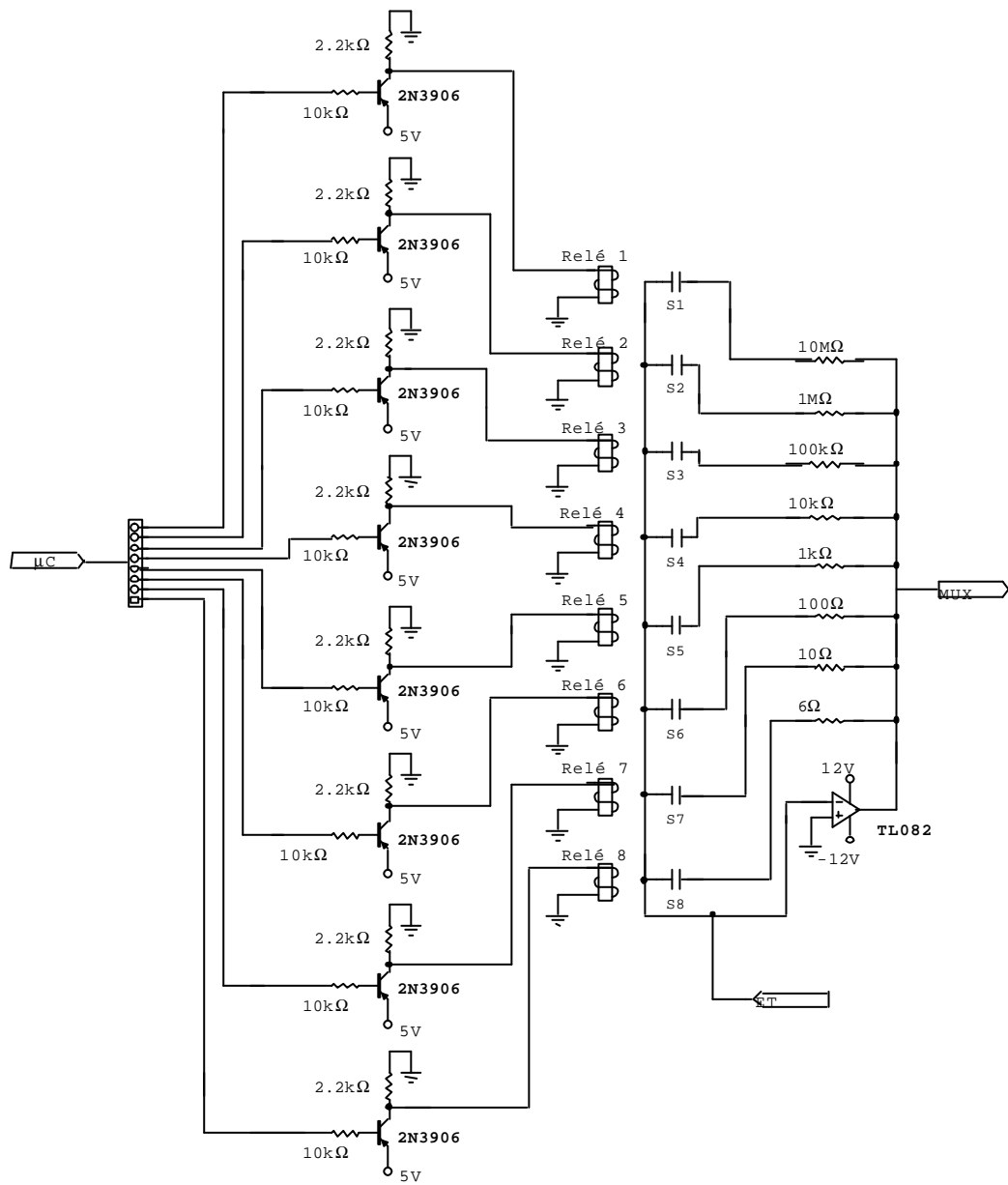
$$R = V/I \quad (20)$$

Tabla 3. Rangos de corriente medidos por el circuito convertidor de corriente a voltaje

Valor de R	Rango de corriente
10 MΩ	±10 nA a ±100 nA
1 MΩ	±100 nA a ±1 μA
100 KΩ	±1 μA a ±10 μA
10 KΩ	±10 μA a ±100 μA
1 KΩ	±100 μA a ±1 mA
100 Ω	±1 mA a ±10 mA
10 Ω	±10 mA a ±100 mA
6 Ω	±100 mA a ± 600 mA

Estas resistencias deben ser de precisión para minimizar los errores en la conversión.

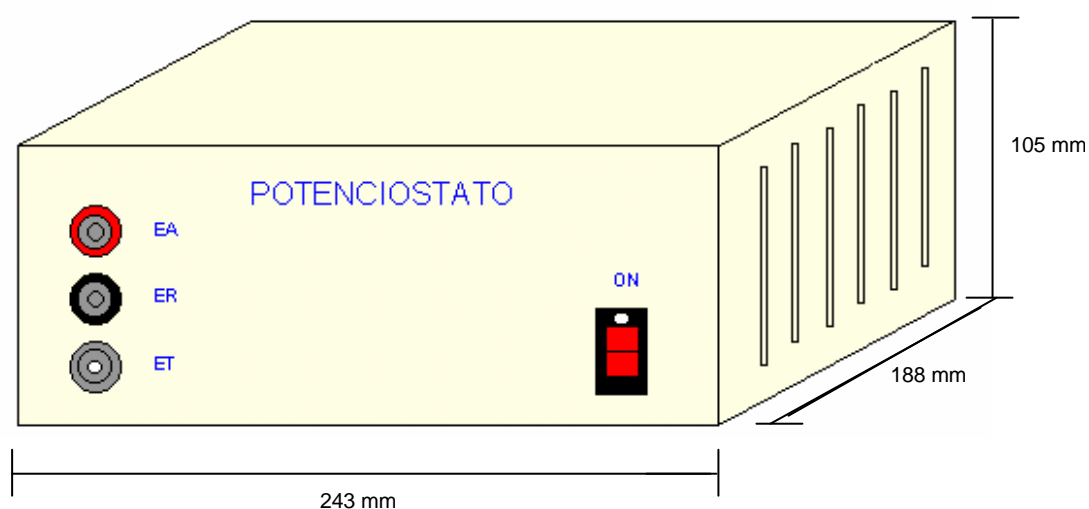
Figura 21. Circuito convertidor de corriente a voltaje



2.2 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

El potencióstato posee una cabina metálica robusta con pies antideslizantes, color marfil. Sus dimensiones, excluyendo los pies son: 234 x 105 x 188 mm (ancho x alto x fondo). Tiene un peso aproximado de 2.2 kilogramos.

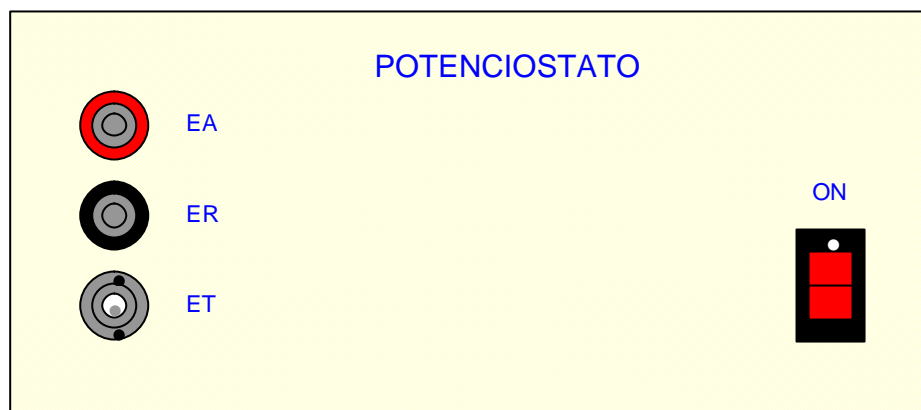
Figura 22. Dimensiones del potencióstato



2.3 DESCRIPCIÓN DE CONTROLES

El potencióstato posee dos paneles (frontal y posterior), en los cuales se encuentran ubicados los conectores de los electrodos, cable de red, cable serial y otros controles.

Figura 23. Panel frontal del potenciostato



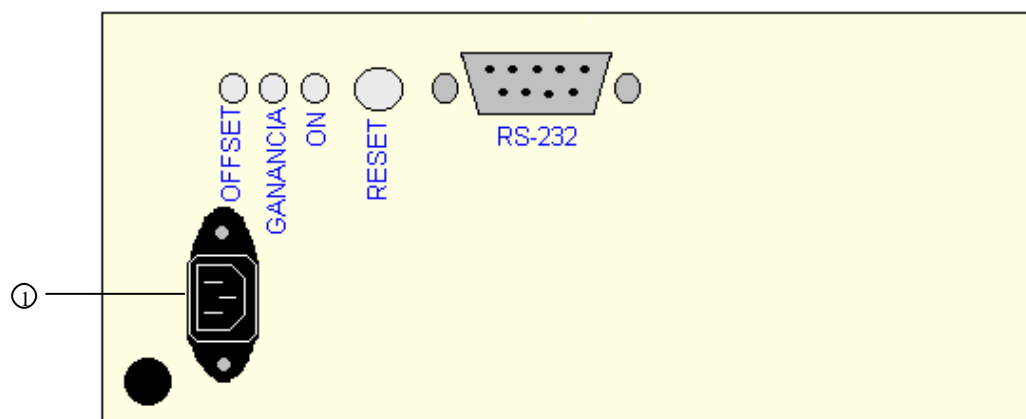
EA: conector del electrodo auxiliar o contraelectrodo.

ER: conector del electrodo de referencia.

ET: conector del electrodo de trabajo.

ON: interruptor de encendido y apagado.

Figura 24. Panel posterior del potenciostato



OFFSET: control de ajuste del offset del DAC714.

GANANCIA: control de ajuste de la ganancia del DAC714.

ON: led indicador de encendido de la tarjeta de control.

RESET: reset del PIC16F877.

RS232: conector del cable serial. Comunica al potenciómetro con el ordenador.

① : conector del cable de alimentación red.

2.4 ESPECIFICACIONES

Especificaciones del potenciómetro

Electrodo de Trabajo (ET)	
- Rango de resistores de corriente:	6 Ω a 10 M Ω
- Rangos de corriente a plena escala:	10 nA a 600 mA
Electrodo Auxiliar (EA)	
- Voltaje de salida	± 2 V
- Corriente de salida máxima	1 A
- Protección contra cortocircuito	
Electrodo de Referencia (ER)	
- Impedancia de entrada:	>10 G Ω
- Rechazo, $f < 200$ kHz:	120 dB
- Medida de potenciales en circuito abierto	
Polarización DC	
- Rango de voltaje:	+2 V a -2 V
- Resolución máxima:	0.1 mV (ADC, DAC 16 bits)
Barrido DC	
- Tipo:	rampa
- Altura de paso, Min:	0.1 mV
Max:	3.3 V

Mecánica	
- Alimentación de red:	110 V a 60 Hz
- Dimensiones (alto x ancho x fondo):	105 x 243 x 189 mm
- Peso:	2.2 kg
- Color:	Marfil
- Carcaza metálica	
- Pies antideslizantes	
- Incluye cables de red, seria y electrodos.	

3. CELDA ELECTROQUÍMICA DE PRUEBA

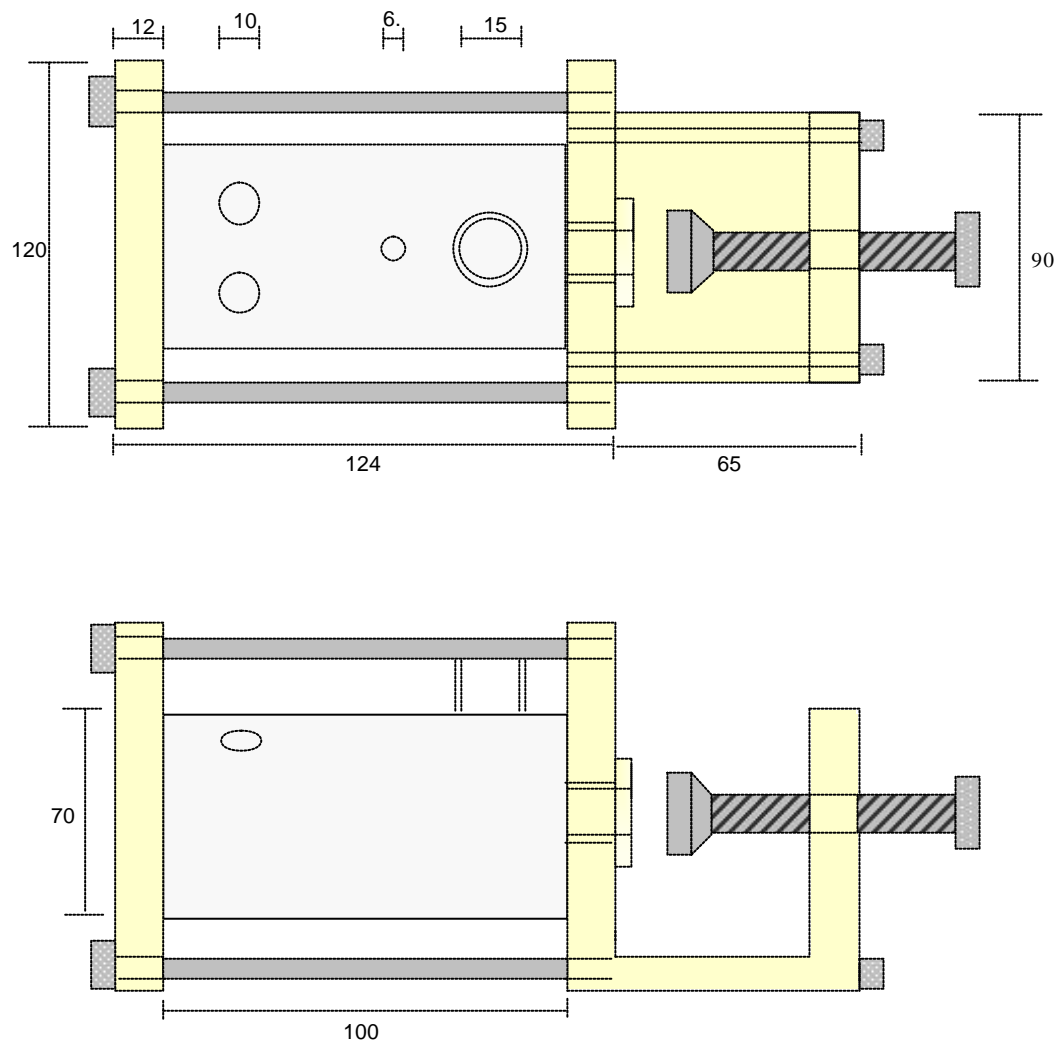
3.1 CONSTITUCIÓN

La celda electroquímica utilizada es una celda plana la cual consta de un cilindro de vidrio pirex en posición horizontal sujeto entre dos placas de acrílico ubicadas en sus extremos.

El cilindro posee cuatro orificios ubicados en la parte superior que permiten la inserción de los elementos necesarios para el bombeo de la solución, el purgado de gas, la ubicación de los electrodos de referencia y auxiliar, tubo de **Luggin** y la toma de la temperatura en la celda; el electrodo de trabajo se coloca por fuera de la celda, entre la prensa y la junta limitadora de área la cual está alojada en una de las placas. Cuatro tornillos aseguran cada una de las placas al cilindro de vidrio (véase figura 25).

La forma cilíndrica de la celda plana y la colocación del contraelectrodo directamente opuesta al electrodo de trabajo, proporciona una óptima distribución de corriente sobre la superficie del electrodo de trabajo. La ubicación del electrodo de referencia dentro del tubo de **Luggin** el cual posee un capilar de 2 mm de diámetro, produce un mínimo apantallamiento de la superficie del electrodo de trabajo. Por consiguiente, se puede reducir el potencial de error debido a la resistencia descompensada entre el capilar de **Luggin** y el electrodo de trabajo.

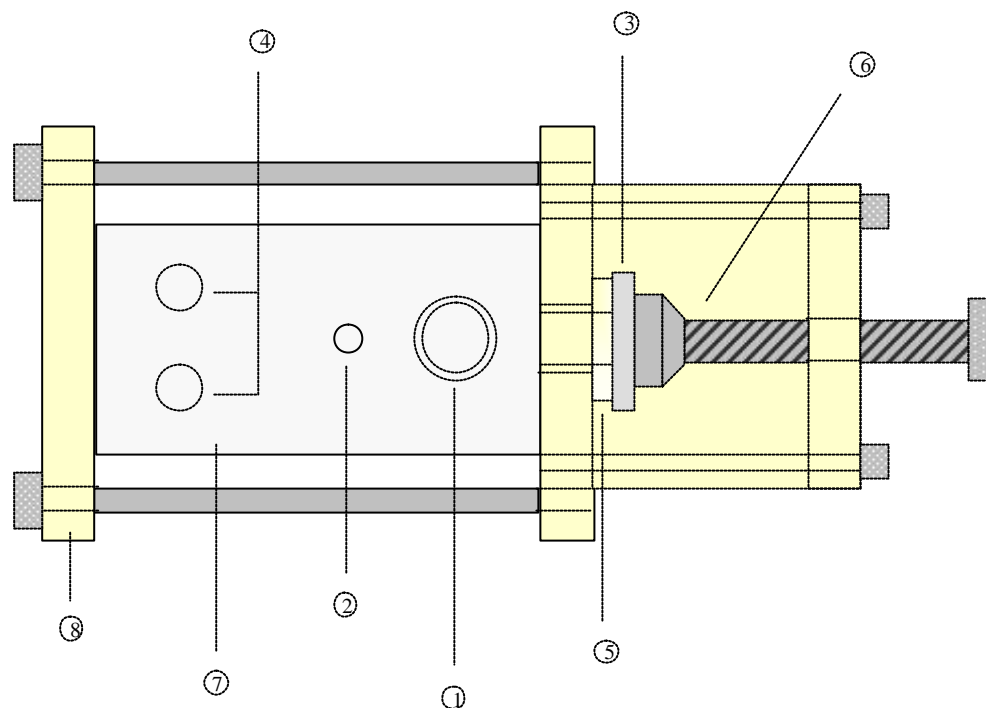
Figura 25. Dimensiones de la celda electroquímica



Todas las medidas en milímetros.

3.2 ELEMENTOS

Figura 26. Disposición de los elementos en la celda electroquímica



- ① : orificio para el sistema tubo de Luggin – ER.
- ② : orificio para el electrodo auxiliar.
- ③ : electrodo de trabajo.
- ④ : orificios para el purgado, entrada y salida de gases, toma de temperatura y llenado de la celda.
- ⑤ : junta limitadora de área.
- ⑥ : prensa.
- ⑦ : cilindro de vidrio pirex.
- ⑧ : tapa lateral.

3.2.1 Electrodo de referencia. El electrodo utilizado es de plata/cloruro de plata (Ag/AgCl) con una solución interna de KCl 3 M, marca **Metrohm** y referencia **6.0733.100**. Sus principales características son:

- Potencial de referencia a 25°C: 207 mV
- Resistencia del elemento de referencia: 3 K Ω
- Resistencia del diafragma: 0.4 a 0.9 K Ω
- Electrolito de referencia: c(KCl) = 3 mol/L

En el anexo C se encuentran las especificaciones restantes. El cable utilizado para el ER posee dos conectores banana – banana tipo B, de un metro de longitud y referencia **6.2106.020**.

3.2.2 Electrodo auxiliar o contraelectrodo. El electrodo empleado es de platino marca **BAS** y referencia **MW-1032**. Sus especificaciones son:

- Longitud: 7.5 cm.
- Diámetro del alambre de platino: 0.5 mm
- Tipo de Conector: platinizado.
- Mango cilíndrico de CTFE.

El EA se conecta al equipo mediante un cable de cobre número 20 con terminales banana - caimán. Para información adicional sobre las especificaciones de este electrodo véase anexo C.

3.2.3 Electrodo de trabajo. Se debe utilizar una lámina del material a examinar, su forma no es crítica ya que ésta es dada por la junta, la cual limita el área del electrodo de trabajo que será expuesta a la solución de la celda. Se dispone de tres juntas limitadoras de área para superficies circulares de 0.7, 1 y 1.5 cm².

La conexión eléctrica del ET al potencióstato es hecha mediante un cable apantallado con conector BNC - caimán.

3.2.4 Tubo de Luggin. Está hecho de vidrio pirex. Posee un tapón de agar-agar el cual es una membrana que permite el intercambio de corriente eléctrica (en forma iónica), sin intercambio de solución. El tapón de agar-agar, se usa para evitar la contaminación del electrodo de referencia con la solución de prueba.

3.3 ESPECIFICACIONES

Electrodos	
- Electrodo de Referencia (ER):	Ag/AgCl (KCl 3M)
- Electrodo Auxiliar (EA):	Platino
- Electrodo de Trabajo (ET):	Lámina del material a ensayar
Dimensiones	
- Volumen:	250 cm ³
- Distancia entre ET y EA :	70 mm
- Area de exposición del ET:	0.7 cm ² , 1 cm ² y 1.5 cm ²
- Orificio para el tubo de Luggin:	16 mm
- Orificio para entrada y salida de gases:	10 mm
- Orificio para el electrodo auxiliar:	6.5 mm
Materiales	
- Tipo:	Celda plana
- Junta limitadora:	Teflón
- Cilindro:	Vidrio pirex
- Placas:	Acrílico

4. SOFTWARE

4.1 PROGRAMA DE CONTROL

4.1.1 Lenguaje de Programación. Para el diseño del programa de control se empleó el lenguaje de programación **delphi 5**, el cual está orientado a objetos y dentro de sus principales características se encuentran:

- Herramienta de desarrollo más rápida y productiva para la web y desarrollo de bases de datos.
- Velocidad de ejecución, compilación y enlace cercanas al C++, y por lo tanto mucho mejores que otros lenguajes existentes.
- Programación orientada a objetos verdadera, permite encapsulamiento, herencia y polimorfismo.
- Componentes integrados dentro del lenguaje, lo que reduce considerablemente la utilización de librerías y controles externos.
- Tratamiento de errores mediante excepciones.
- Soporte avanzado de bases de datos mediante BDE (Borland Database Engine), ADO (ActiveX Database Objects), tecnología de Microsoft de acceso a bases de datos e Internet que incorporará el próximo Windows

2000, y finalmente Interbase Express, acceso nativo a Interbase, para desarrollo Cliente/Servidor off-line.

- Modelo de datos y relaciones de forma visual.
- Asistentes y componentes para Internet/Intranet.
- Componentes compatibles con Microsoft Office.
- Fácil integración de informes y gráficos de gestión.

4.1.2 Características. El programa de control diseñado posee ciertas cualidades que se describen a continuación:

- Realiza en tiempo real la gráfica de los datos arrojados por la prueba.
- Permite analizar los datos obtenidos para establecer los parámetros que caracterizan la corrosión de la muestra.
- Los resultados se visualizan en forma tabulada y en gráficas, tanto lineales como logarítmicas, buscando la mayor flexibilidad en el control de la experiencia.

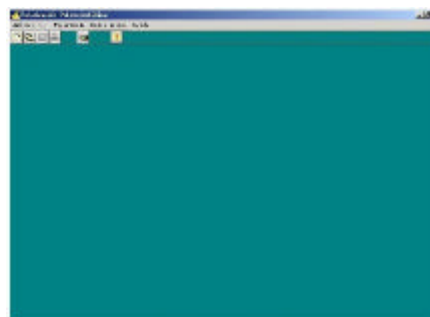
- Presenta la opción de modificar las escalas en ambos ejes de forma independiente y suministra las coordenadas de un punto con sólo hacer clic con el puntero sobre la zona de interés.
- Almacena en una base datos las condiciones (material, solución, área, etc.) bajo las cuales se realizó la prueba y los resultados arrojados por ésta.
- Posee un menú de ayuda que facilita la utilización del programa.

4.1.3 Descripción. El software de control posee una ventana de inicio la cual presenta las técnicas electroquímicas que se pueden realizar con el equipo (véase figura 27). El usuario podrá elegir la técnica que desee con sólo pulsar el botón marcado con el nombre de la misma, abriéndose la ventana principal correspondiente al tipo de prueba seleccionado. En la figura 28 se muestra la ventana principal perteneciente a la prueba de polarización potencioestática.

Figura 27. Ventana de inicio



Figura 28. Ventana principal de la polarización potenciostática











En la ventana inicio (figura 27) esta presente la opción de calibración del equipo, la cual despliega una nueva ventana para realizar esta función (veáse figura 29).

Figura 29. Ventana de calibración del equipo



4.1.3.1 Barra de herramientas. Contiene las siguientes opciones disponibles:

Tabla 4. Iconos en las barra de herramientas

ICONO	DESCRIPCIÓN
	Crea un archivo nuevo.
	Abre un archivo existente.
	Guarda un archivo.
	Imprime un archivo.
	Lleva a la ventana anterior.
	Lleva a la ayuda del programa de control.
	Cancela la prueba.
	Inicia la prueba.

4.1.3.2 Barra de Menús. Se encuentran las opciones de archivo, ver, experiencia, instrumentos y ayuda (veáse figura 30). Al inicio de cada prueba las opciones de ver y experiencia se encuentran deshabilitadas; la primera sólo se activará al abrir un archivo existente o al finalizar la prueba, y la segunda, cuando se registren todos los campos de las condiciones iniciales. En la ventana de condiciones iniciales de cada prueba se presenta una barra similar, sin la opción de instrumentos.

Figura 30. Barra de menús



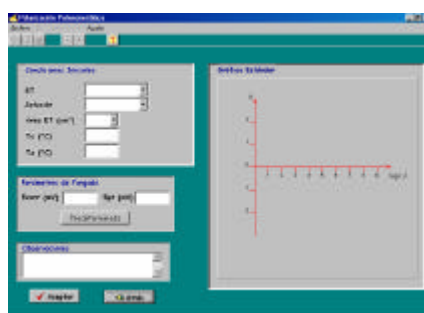
- **Menú Archivo.** Muestra las funciones básicas del programa como son: nuevo, abrir, guardar, imprimir y salir. El submenú **Nuevo** crea un archivo de la técnica electroquímica en la que se encuentre el usuario (ver figura 31).

Figura 31. Submenú nuevo



Al escoger este submenú, se abrirá la ventana de condiciones iniciales, cuyos campos serán llenados por el usuario. La figura 32 muestra esta ventana para el caso de la técnica de polarización potenciostática.

Figura 32. Ventana de condiciones iniciales (polarización potenciostática)



El submenú **Abrir** permite abrir un archivo existente en el programa correspondiente a la técnica utilizada (véase figura 33); al escoger esta opción se abrirá una nueva ventana (figura 34), donde se selecciona el archivo deseado; el archivo abierto se podrá visualizar en las ventanas de condiciones iniciales (figura 35) y de resultados de la prueba.

Figura 33. Submenú abrir



Figura 34. Ventana abrir

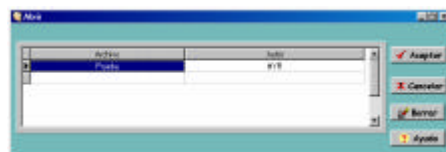
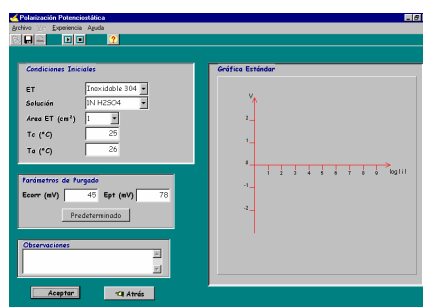


Figura 35. Ventana desplegada de un archivo existente



En la ventana de abrir también se presenta la opción de *borrar un archivo* existente en el software, para lo cual es necesario introducir de una contraseña (veáse figura 36).

Figura 36. Ventana de contraseña



El submenú **Guardar** salva las condiciones iniciales de la prueba y los datos leídos durante los procesos de purgado y polarización; sólo se habilitará cuando se hayan registrado los campos de las condiciones iniciales (véase figura 37).

Figura 37. Submenú guardar



Al seleccionar este submenú, se abrirá una ventana donde se consignarán el nombre del archivo y del autor de la prueba (véase figura 38).

Figura 38. Ventana guardar

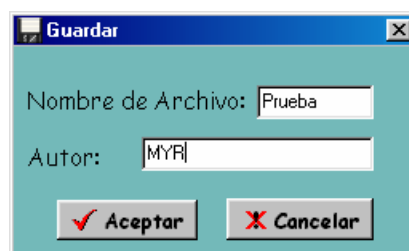
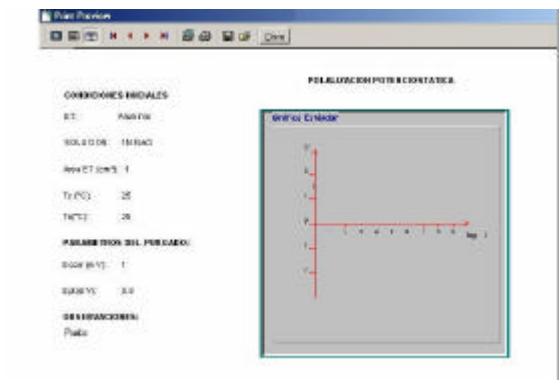


Figura 39. Submenú imprimir



Figura 40. ventana de impresión



El submenú **Salir** permite abandonar el software de control.

Figura 41. Submenú salir



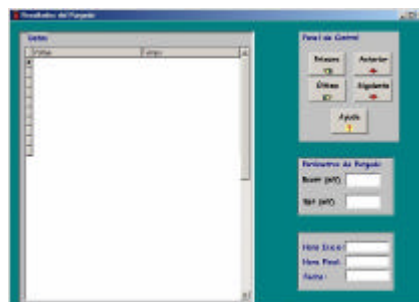
- **Menú Ver.** Esta opción permite observar en forma de texto y gráfica los datos obtenidos en los procesos de purgado y polarización.

La opción **Purgado** del submenú **Resultados** (figura 42), abre una ventana que mostrará en forma de texto los datos leídos durante este proceso, los parámetros obtenidos en el purgado, la hora y la fecha de realización de la prueba (figura 43). El panel de control que aparece en esta ventana permite el manejo de la tabla en la cual están consignados los datos.

Figura 42. Opción purgado del submenú resultados



Figura 43. Ventana de resultados del purgado

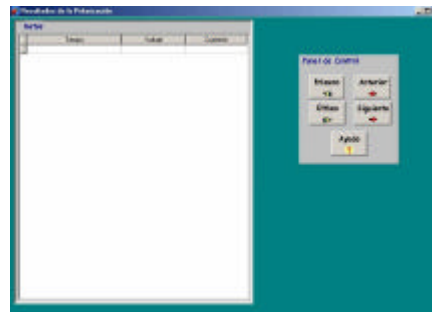


La opción **Polarización** presente en el submenú **Resultados** (figura 44), visualiza en forma tabulada los datos leídos en este proceso (véase figura 45). Mediante el panel de control de esta ventana se maneja la tabla que contiene los datos.

Figura 44. Opción polarización del submenú resultados



Figura 45. Ventana de resultados de la polarización



En el submenú **Gráficas**, la opción **Purgado** despliega una ventana que permite graficar los datos del purgado contra el tiempo (véase figura 46).

Figura 46. Opción de purgado del submenú gráficas



La opción **Polarización** del submenú **Gráficas**, despliega una ventana que presenta varias alternativas para graficar los datos de polarización (figura 47), permitiéndole al usuario analizar los resultados desde diferentes perspectivas.

Figura 47. Opción de polarización del submenú gráficas



- **Menú Experiencia.** Permite el inicio y la finalización de la prueba. Al seleccionar el submenú **Correr**, se visualizará la ventana para iniciar el proceso de purgado (figura 49); al pulsar *aceptar* en esta ventana, saldrá la *barra de tiempo* que indica la duración de este proceso (véase figura 50).

Figura 48. Submenú correr



Figura 49. Ventana inicio de la prueba

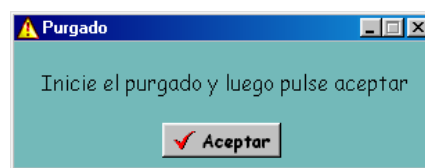
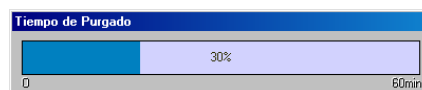


Figura 50. Barra de tiempo del purgado

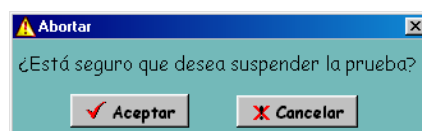


El submenú **Abortar** suspende la prueba, mostrando antes una ventana de aviso para confirmar esta acción (veáse figura 52). Al pulsar *aceptar* en esta ventana la prueba se suspenderá automáticamente.

Figura 51. Submenú abortar



Figura 52. Ventana de confirmación



- **Menú Instrumentos.** Contiene los submenús **Celda** y **Potenciostato** los cuales proporcionan información acerca de las características generales de la celda de prueba y el potenciostato respectivamente (veánse figuras 53-56).

Figura 53. Submenú celda

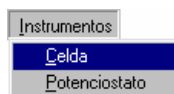


Figura 54. Ventana de características de la celda

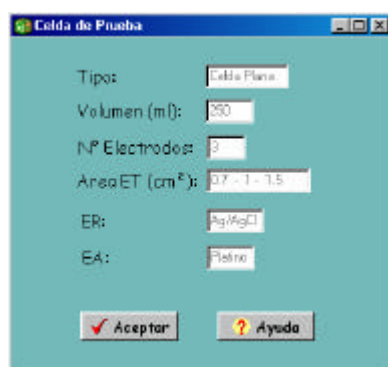
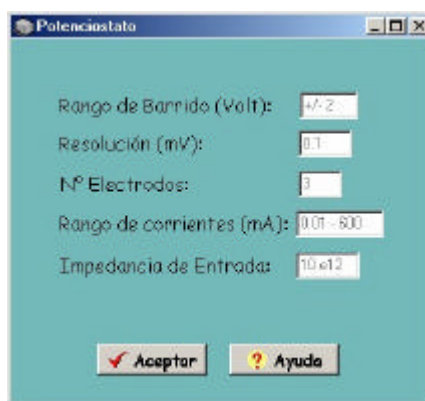


Figura 55. Submenú Potenciostato



Figura 56. Ventana de características del potenciostato



- **Menú Ayuda.** El submenú **Índice** (figura 57) muestra la tabla de contenido de la ayuda del software de control la cual le facilitará al usuario el manejo éste (figura 58). En el submenú **Acerca De** (figura 59) se presenta una breve información sobre los autores del proyecto (veáse figura 60).

Figura 57. Submenú índice



Figura 58. Ventana de ayuda general

AYUDA GENERAL DEL SOFTWARE DE CONTROL

INDICE

[INTRODUCCIÓN](#)

1. [INSTALACIÓN](#) (Instalación del software)

2. [CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA](#)

3. [INSTRUMENTACIÓN](#)

3.1 [POTENCIOSTATO](#)

3.1.1 [Medición de corriente](#)

3.2 [CELDA ELECTROQUIMICA DE PRUEBA](#)

3.3 [CONEXIÓN](#)

4. [SELECCIÓN DE LA TECNICA ELECTROQUIMICA](#)

4.1 [CALIBRACIÓN DEL EQUIPO](#)

5. [CREACION DE UN ARCHIVO NUEVO](#)

Figura 59. Submenú Acerca De



Figura 60. Ventana Acerca De



4.2 PROGRAMA DEL MICROCONTROLADOR

4.2.1 Código fuente

;Trabaja con SPI y INTRB0 Y INTERRUPCION SERIAL

INCLUDE P16F877.INC

CBLOCK 0X20

DATO1,DATO2,W_AUX,STATUS_AUX,VELO,FLAG,DATO,TRA,CARGA

C_ROT,C_CONT,C_DATO,C_AUX,AUX_DATO,ADC_L,ADC_H,CONT,CO

NT1,DAC_H,DAC_L

LOOP1, LOOP2, LOOP3

ENDC

BANCO0 MACRO ;MACRO PARA SELECCIONAR

DATA RAM EN BANCO0

BCF STATUS,RP0

BCF STATUS,RP1

ENDM

BANCO1 MACRO ;MACRO PARA SELECCIONAR

DATA RAM EN BANCO1

BSF STATUS,RP0

BCF STATUS,RP1

ENDM

BANCO2 MACRO ;MACRO PARA SELECCIONAR

DATA RAM EN BANCO2

BCF STATUS,RP0

BSF STATUS,RP1

ENDM

#DEFINE PULSO PORTC,0

```
#DEFINE A0 PORTC,1
```

```
#DEFINE A1 PORTC,2
```

```
#DEFINE BUSY PORTB,3
```

```
ORG 00
```

```
GOTOPPAL
```

```
ORG 04
```

```
GOTOINT
```

```
PPAL
```

```
BSF STATUS,RP0 ;Banco 1
```

```
MOVLW 06
```

```
MOVWF ADCON1
```

```
MOVLW B'10000000'
```

```
MOVWF TRISC
```

```
;CONFIGURACIÓN DE SPI
```

```
BCF TRISC,5 ;Salida SPI
```

```
BSF TRISC,4 ;Entrada SPI
```

```
BCF TRISC,3 ;MODO MAESTRO (RELOJ)
```

```
BSF TRISA,5 ;Habilitador de esclavo
```

```
MOVLW 00
```

```
MOVWF TRISB
```

```
MOVWF    TRISA
MOVWF    TRISE
MOVWF    TRISD
```

```
BSF  TRISB,3
```

```
MOVLW    B'00000000'
MOVWF    SSPSTAT
```

```
MOVLW    B'00000000'
MOVWF    OPTION_REG
```

```
MOVLW    B'01010000'
MOVWF    INTCON
CLRF INTCON
```

```
MOVLW    B'00100000'
MOVWF    PIE1      ;HABILITA LA INT DE RECEPCION
```

```
;  CLRF PIE1
    CLRF PIE2
```

```
BCF  STATUS,RP0
```

```
CLRF PIR1
CLRF PIR2
```

```
MOVLW    B'00100001'
MOVWF    SSPCON    ;Configura SPI
```

```
BCF  INTCON,7
CALL PC_CONFI
```

```
MOVLW    B'10000000'
MOVWF    RCSTA
BCF  PIR1,RCIF
BSF  RCSTA,CREN
```

```
;    BSF  INTCON,7
```

```
BSF  A0
BSF  A1
BSF  PULSO
```

```
MOVLW    0FF
MOVWF    PORTA
MOVWF    PORTE
MOVWF    PORTD
```

PROGRAMA

```
CALL RECIBE
MOVLW    .55
XORWF    DATO1,W
BTFSC    STATUS,Z
CALL SACAR
```

```
MOVLW    .56
XORWF    DATO1,W
BTFSC    STATUS,Z
CALL LEER
```

GOTOPROGRAMA

LEER

CALL RECIBE
MOVFDATO1,W
MOVWF PORTB
CALL CONVIERTE
RETURN

SACAR

CALL SACA
RETURN

CAPTURA

CALL RECIBE
MOVFDATO1,W
MOVWF DATO
MOVLW .15
MOVWF DATO1
CALL TRASMITTE

CALL CAMBIA
RETURN

INT BCF INTCON,7
CALL GUARDA

BCF STATUS,RP0 ;Banco 0
BCF STATUS,RP1

```
BTFSC    PIR1,5  
GOTOINT_REC
```

FIN_INT

```
CALL RECUPERA  
BCF  PIR1,5  
BCF  INTCON,INTF  
BSF  INTCON,7  
RETFIE
```

INT_REC

```
GOTOFIN_INT  
BCF  INTCON,7  
CALL LIMPIA  
CALL CAPTURA  
BSF  INTCON,7  
GOTOFIN_INT
```

SOBREFLUJO

```
BCF  RCSTA,OERR  
CALL LIMPIA  
RETURN
```

FRAMING

```
BCF  RCSTA,FERR  
CALL LIMPIA  
RETURN
```

GUARDA

```
MOVWF W_AUX
```



```
    SWAPF STATUS,F
    SWAPF STATUS,W
    MOVWF STATUS_AUX
    RETURN
```

RECUPERA

```
    SWAPF STATUS_AUX,F
    SWAPF STATUS_AUX,W
    MOVWF STATUS
    SWAPF W_AUX,F
    SWAPF W_AUX,W
    RETURN
```

TRASMITE

```
    BCF  INTCON,7
    MOVLW  B'10000000'
    MOVWF  RCSTA
    CALL TX_OFF
    MOVF DATO1,W
    MOVWF  TXREG
    RETURN
```

```
TX_OFF  BTFSS  PIR1,TXIF
        GOTOTX_OFF
        RETURN
```

RECIBE CALL LIMPIA

```
    MOVLW  B'10000000'
    MOVWF  RCSTA
    BCF  PIR1,RCIF
```

BSF RCSTA,CREN

RC_OFF BTFSS PIR1,RCIF
GOTORC_OFF

BTFSC RCSTA,OERR
GOTOSOBREFLUJO
BTFSC RCSTA,FERR
GOTOFRAMING
MOVFRCREG,W
MOVWF DATO1
RETURN

LIMPIA

BTFSS PIR1,RCIF
RETURN
MOVF RCREG,W
GOTOLIMPIA

PC_CONFI

BSF STATUS,RP0
BSF TRISC,7
BCF TRISC,6
MOVLW .25 ; QUE SE TRABAJA A 9600 BAUDIOS
MOVWF SPBRG
MOVLW B'00100100'
MOVWF TXSTA
BCF STATUS,RP0 ;Banco 0
BCF PIR1,TXIF
BCF PIR1,RCIF

```
    MOVLW    B'10000000'  
    MOVWF    RCSTA  
    RETURN
```

ENVIA_SPI

```
    BANCO1  
    BCF     SSPSTAT,BF  
    BANCO0  
    BCF     PIR1,SSPIF  
    MOVF    DATO,W  
    MOVWF    SSPBUF
```

TX_WAIT

```
    BTFSS    PIR1,SSPIF  
    GOTOTX_WAIT  
    MOVF    SSPBUF,W  
    MOVWF    DATO  
    BCF     PIR1,SSPIF  
    RETURN
```

```
CAMBIA    MOVLW    .8  
    MOVWF    C_CONT  
    MOVLW    B'00000001'  
    MOVWF    C_ROT  
    CLRF    C_DATO  
    MOVF    DATO,W  
    MOVWF    C_AUX  
    BSF     STATUS,C
```

EMPIEZA

```
    RLF     C_AUX,F
```

```
BTFSC     STATUS,C
CALL PON
BCF  STATUS,C
RLF  C_ROT,F
DECFSZ  C_CONT
GOTOEMPIEZA
MOVFC_DATO,W
MOVWF   DATO
RETURN
```

```
PON  MOVFC_ROT,W
      IORWF   C_DATO,F
      RETURN
```

```
CONVIERTE
      BTFSS   BUSY
      GOTOCONVIERTE
```

```
CALL DELAY
```

```
BCF  PULSO
```

```
ESPERA
      BTFSC   BUSY
      GOTOESPERA
```

```
ESPERA1
      BTFSS   BUSY
      GOTOESPERA1
```

```
CALL ENVIA_SPI
MOVFDATO,W
MOVWF    ADC_H
```

```
CALL ENVIA_SPI
MOVFDATO,W
MOVWF    ADC_L
```

```
BSF  PULSO
```

```
MOVFADC_H,W
MOVWF    DATO1
CALL TRASMITE
```

```
MOVFADC_L,W
MOVWF    DATO1
CALL TRASMITE
```

```
MOVLW    .15
MOVWF    DATO1
CALL TRASMITE
```

```
RETURN
```

```
RETARDO
```

```
    CLR  CONT
ZX  DECFSZ  CONT
    GOTOZX
    RETURN
```

SACA

```
CALL RECIBE
MOVFDATO1,W
MOVWF    DAC_H
```

```
CALL RECIBE
MOVFDATO1,W
MOVWF    DAC_L
```

```
CALL RECIBE
MOVFDATO1,W
MOVWF    PORTA
```

```
CALL RECIBE
MOVFDATO1,W
MOVWF    PORTE
```

```
MOVLW    .15
MOVWF    DATO1
CALL TRASMITE
```

```
BCF  A0
NOP
NOP
NOP
```

```
MOVFDAC_H,W
MOVWF    DATO
CALL ENVIA_SPI
```

```
MOVFDAC_L,W
MOVWF    DATO
CALL ENVIA_SPI
```

```
NOP
NOP
NOP
NOP
```

```
BSF  A0
NOP
NOP
NOP
BCF  A1
NOP
NOP
NOP
NOP
BSF  A1
RETURN
```

```
DELAY    MOVLW    .120      ;RETARDO DE 120MS
        MOVWF     LOOP1
```

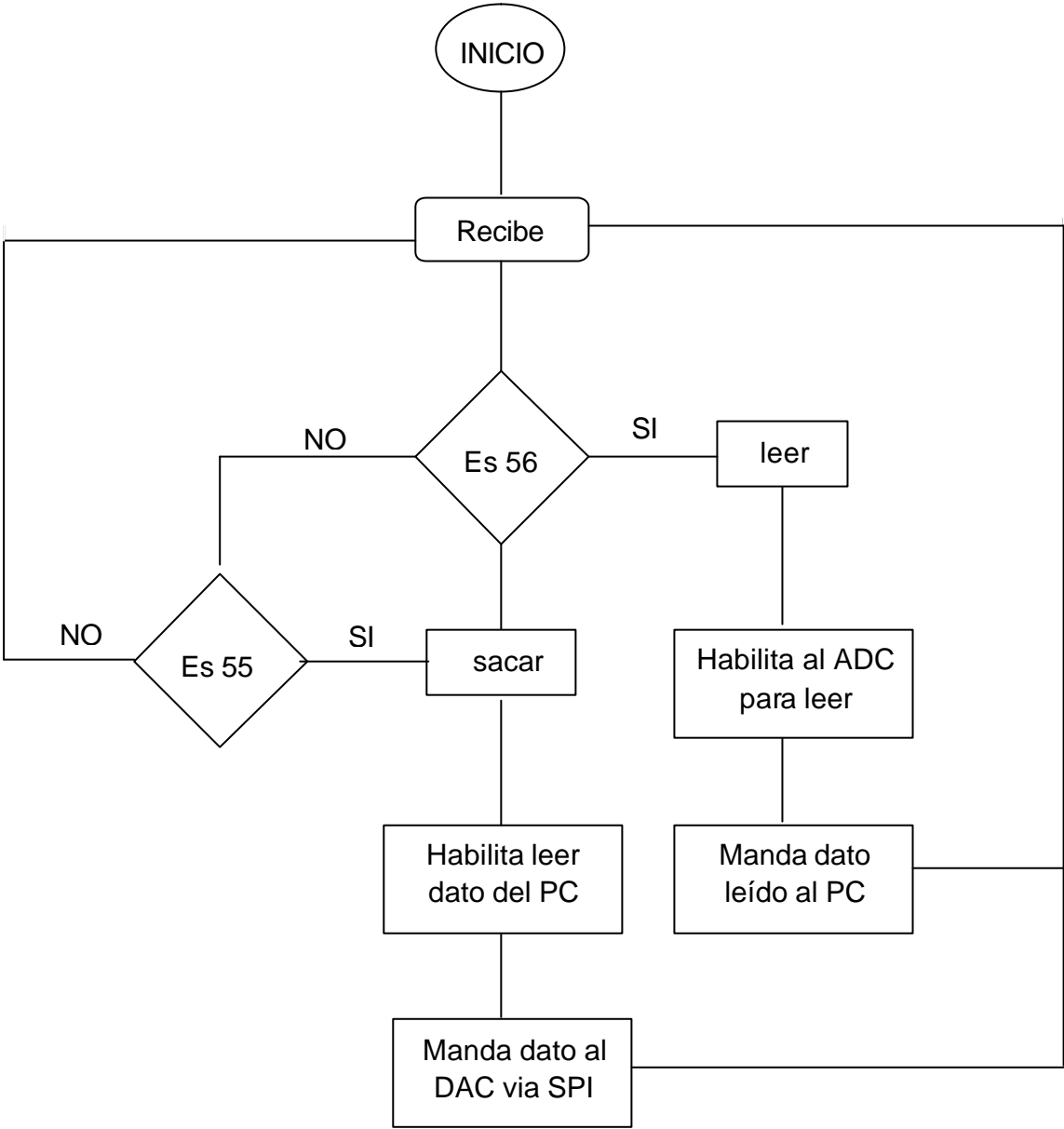
```
OUTTER    MOVLW    .249
        MOVWF     LOOP2
```

```
INNER     NOP
        NOP
        NOP
```

```
NOP
NOP
NOP
NOP
DECFSZ    LOOP2, F
GOTOINNER
DECFSZ    LOOP1, F
GOTOOUTTER
RETURN

END
```


Figura 61. Diagrama de flujo



4.3 REQUISITOS DEL SISTEMA

- Procesador mayor de 500 Mhz
- Microsoft windows 98 o superior
- Un puerto serial adicional con conector DB-9.
- Memoria RAM de 32 MB mínimo.
- Espacio en disco duro de 1Gb
- Unidad de CD ROM.
- Configuración regional (discrimina la coma y punto) . Ruta :
Inicio - configuración - panel de control – configuración regional – número;
Símbolo decimal (punto)
Símbolo de separación de miles (coma)
Inicio - configuración - panel de control – configuración regional - moneda;
Símbolo decimal (punto)
Símbolo de separación de miles (coma)
- Elección del puerto serial del PC; el equipo debe ser conectado al COM 1

5. RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

El resultado de la investigación consiste en:

1. Un equipo trazador de curvas, constituido por un potencióstato y una celda electroquímica.
2. El software, el cual registra y grafica los datos que se obtuvieron en el ensayo de corrosión.
3. Se incluyen manuales de funcionamiento y mantenimiento de los equipos, así como planos, códigos fuentes del software para posibles modificaciones en proyectos futuros.
4. El diseño y la construcción del equipo será puesta a prueba realizando un ensayo normalizado referenciado en el estándar ASTM G5-94.

6. CONCLUSIONES

A través del prototipo construido se logró el desarrollo de las técnicas electroquímicas DC, que permiten la observación del comportamiento de diversas muestras metálicas en presencia de un medio agresivo y su posterior análisis mediante la interpretación de los resultados presentados en forma gráfica y tabulada.

El desarrollo de este proyecto se encuentra limitado por factores como: la temperatura del medio ambiente (a la cual sean implementadas las pruebas), los medios corrosivos acuosos, los rangos de corrientes medibles en los ensayos (el potencióstato tienen un rango de corriente de 600 mA – 10 nA), y el ruido que influye en todas las medidas que se hacen.

La suma de estos factores contribuyen a que las lecturas de corriente tan pequeñas sean muy variables, a pesar de la etapa de acondicionamiento del equipo.

Una de las alternativas para que el potencióstato obtenga mayor precisión en los procesos de transmisión y recepción; es la utilización de una tarjeta de adquisición de datos, la cual no se usó en este caso, debido a que uno de los enfoques era desarrollar el proyecto a bajo costo.

El software de control diseñado facilita al usuario la realización de las pruebas electroquímicas (polarización potenciostática, polarización potenciodinámica, y polarización cíclica), ya que el proceso es totalmente automático y sólo necesita supervisión.

Este equipo presenta la posibilidad de implementar la etapa galvanostática, la cual permitirá la aplicación de otras técnicas electroquímicas DC; ofreciendo una mayor cobertura en el análisis del comportamiento de un material en un medio corrosivo, y la lectura de parámetros de corrosión.

7. RECOMENDACIONES

1. Implementar en el software de control las pruebas de Resistencia de Polarización y Extrapolación de Tafel.
2. Elaborar una guía de laboratorio en donde se pongan en práctica cada una de las pruebas a desarrollar con este equipo.
3. Diseñar y construir la etapa galvanostática, convirtiendo al equipo en un potenciostato/galvanostato y así ampliar el número de técnicas electroquímicas a aplicar.
4. Elaborar e implementar el control de la temperatura para realizar las prácticas a diferentes temperaturas.
5. Implementar un circuito medidor de corriente de mayor resolución.

BIBLIOGRAFIA

LIBROS

MALVINO, Albert Paul. Principios de electrónica. Quinta edición. Madrid, España: Mc Graw Hill, 1994.

TOCCI, Ronald. Sistemas digitales: Principios y aplicaciones. Sexta edición. Mexico: Prentice Hall, 1996

REISDORPH, Kent. Aprendiendo Borland Delphi 4 en 21 días. Mexico: Prentice Hall, 1.999.

NORMAS ASTM

PÁGINAS WEB

Art7.pdf. Diseño de un equipo para análisis de corrosión. M.Gómez, J. Rivera, F. Almeraya, C. Gaona y A. Martinez.

<http://www.cinstrum.unam.mx:90/i&d/pdfv4n3/art7.PDF>

BAS Platinum Wire Auxiliary Electrodes. Especificaciones del electrodo de platino. BAS.

<http://www.bioanalytical.com/products/ec/auxele.html>

CircuitoZ_net.htm. Integrado MAX-232.

<http://www.circuitos.terra.cl/circuitos.htm>

CORROSION ELECTROQUÍMICA. Generalidades de la corrosión electroquímica.

Laura Puente Pascual y Maria González Briongos.

<http://www.unirioja.es/dptos/dq/qf/qfc/corrosion/corrosion.html>

Corrosion science and engineering information hub. Tutorial sobre corrosión electroquímica. Kingston Technical Software Co.

<http://www.corrosion-doctors.org/>

Electrodos de Medida. Generalidades del electrodo de referencia. UNAM.

<http://redquimica.pquim.unam.mx/fisicoquimica/electroquimica/U4N1.htm>

Estándar RS 232.htm. **Estándar RS-232 y puerto serie.** Tropic Hardware y Electrónica.

<http://www.euskalnet.net/shizuka/rs232.htm>

Gamry Instruments, Inc_ (Tech Tip) Potentiostat primer. Generalidades del potenciostato y electrodo de referencia. Gamry Instruments.

http://www.gamry.com/G2/Appnotes/Reference/RefElect/Potentiostat_primer.htm

IIE. Técnicas electroquímicas de corrosión.

http://www.iie.org.mx/mproquim/serv_web.htm#evalua

Item 6_0733_100 - Metrosensor electrodes and accessories. Especificaciones del electrodo de Ag/AgCl 6_0733_100. Metrohm.

<http://www.metrohm.com/docs/cat/electrodes/data/60733100.html>

KH Design and Development - Electrochemical Corrosion Measurement Techniques. Técnicas electroquímicas de corrosión. KH Design and Development

<http://www.khdesign.co.uk/techniquesindex.htm>

MÁS ALLÁ DE LA HERRUMBRE II_ La Lucha Contra la Corrosión.

Información sobre electrodos de referencia y corrosión electroquímica. Javier Ávila / Joan Genesca.

<http://lectura.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/079/htm/masalla2.htm>

PC KITS-tutorial page (puerto serie, RS-232).htm. **Comunicaciones serie.**

<http://www.ctv.es/pckits/tpseriee.html>

Potstae2.pdf. Funcionamiento de un potencióstato. Bank Elektronik.

<http://www.bank-ic.de/support/download/doku/potstae2.pdf>

Potentiostats. Información del potencióstato. Dr. Eugenii Katz.

<http://chem.ch.huji.ac.il/~eugenii/instruments/electrochemical/potentiostats.htm>

Tutorial de Delphi 5. Características Delphi5.

<http://leo.worldonline.es/acanudas/delphi/tdelphi5.htm>

DATASHEET

ADS7813.pdf. Hojas de especificaciones del ADS7813. Texas Instruments Incorporated.

<http://www-s.ti.com/sc/ds/ads7813.pdf>

CD4051.pdf. Hojas de especificaciones del CD 4051.

<http://www-s.ti.com/sc/psheets/schs047f/schs047f.pdf>

DAC714.pdf. Hojas de especificaciones del DAC714. Texas Instruments Incorporated.

<http://www-s.ti.com/sc/ds/dac714.pdf>

INA128.pdf. Hojas de especificaciones del INA128.

<http://manuales.elo.utfsm.cl/datasheet/burr-brown/PDFFILES/DATASHTS/INA128.PDF>

LM78XX.pdf. Hojas de especificaciones del LM7805 y LM7812.

<http://www.pacalaconcurso.com/archivos/datasheet/LM7805.pdf>

LM79XX.pdf. Hojas de especificaciones del LM7905 y LM7912.

<http://www.pacalaconcurso.com/archivos/datasheet/LM7905.pdf>

MAX232.pdf. Hojas de especificaciones del MAX232.

<http://pdfserv.maxim-ic.com/arpdf/MAX220-MAX249.pdf>

PIC16F8XX.pdf. Hojas de especificaciones del PIC16F877.

<http://216.229.42.210/devicedata/16f87x/30292b.pdf>

TIP127.pdf. Hojas de especificaciones del TIP127.

<http://www.rigelcorp.com/doc/8051/TIP125.pdf>

TIP141.pdf. Hojas de especificaciones del TIP141.

<http://www.fairchildsemi.com/ds/TI/TIP141.pdf>

TL082.pdf. Hojas de especificaciones del TL082.

<http://www.pacalaconcurso.com/archivos/datasheet/TL082.pdf>

2N3904.pdf. Hojas de especificaciones del 2N3904.

<http://www.fairchildsemi.com/ds/2N/2N3904.pdf>

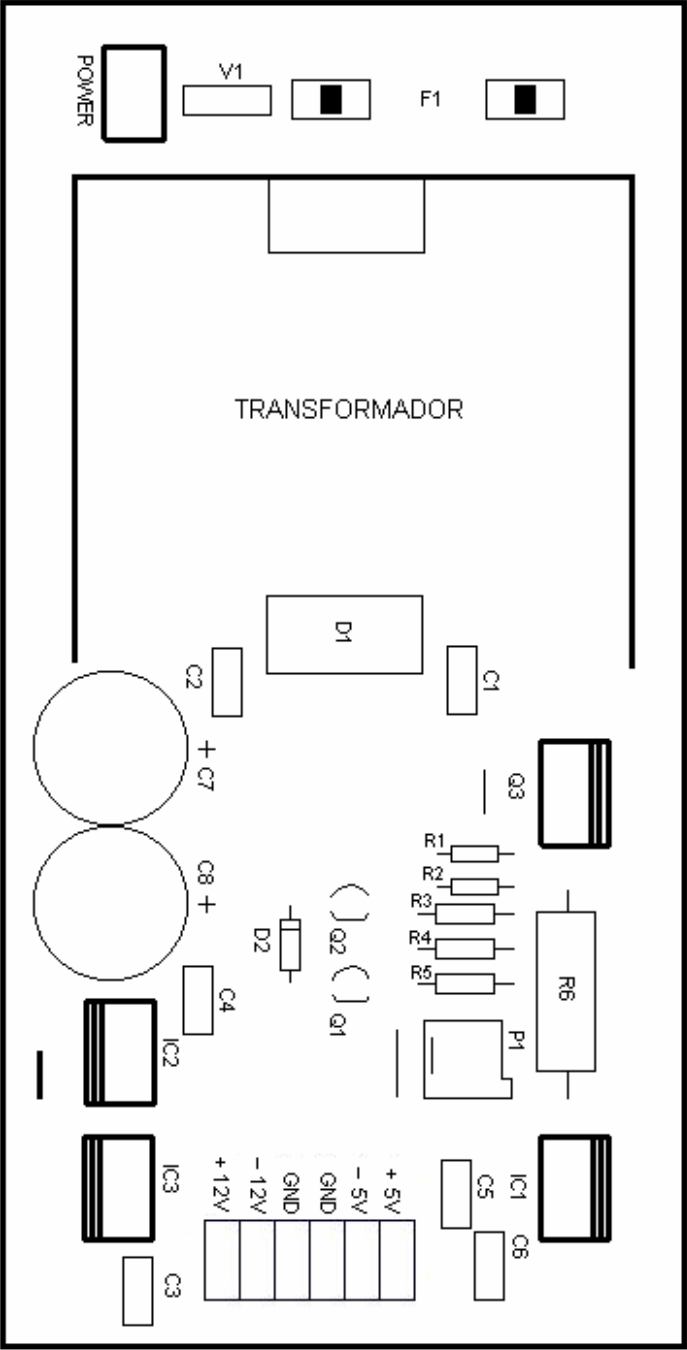
2N3906.pdf. Hojas de especificaciones del 2N3906.

<http://www.fairchildsemi.com/ds/2N/2N3906.pdf>

ANEXOS

ANEXO A. Circuitos impresos

Tarjeta 1. Fuente de alimentación (componentes)



Tarjeta 1. Fuente de alimentación (pistas)

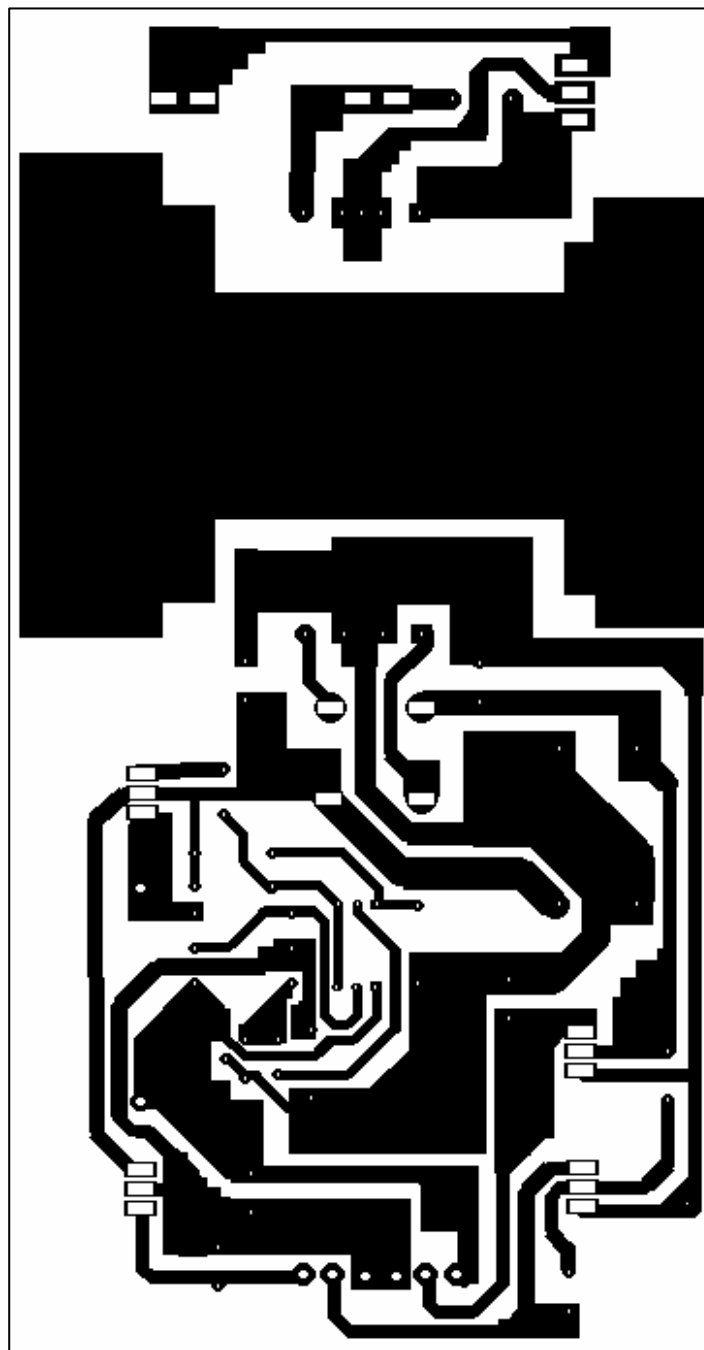
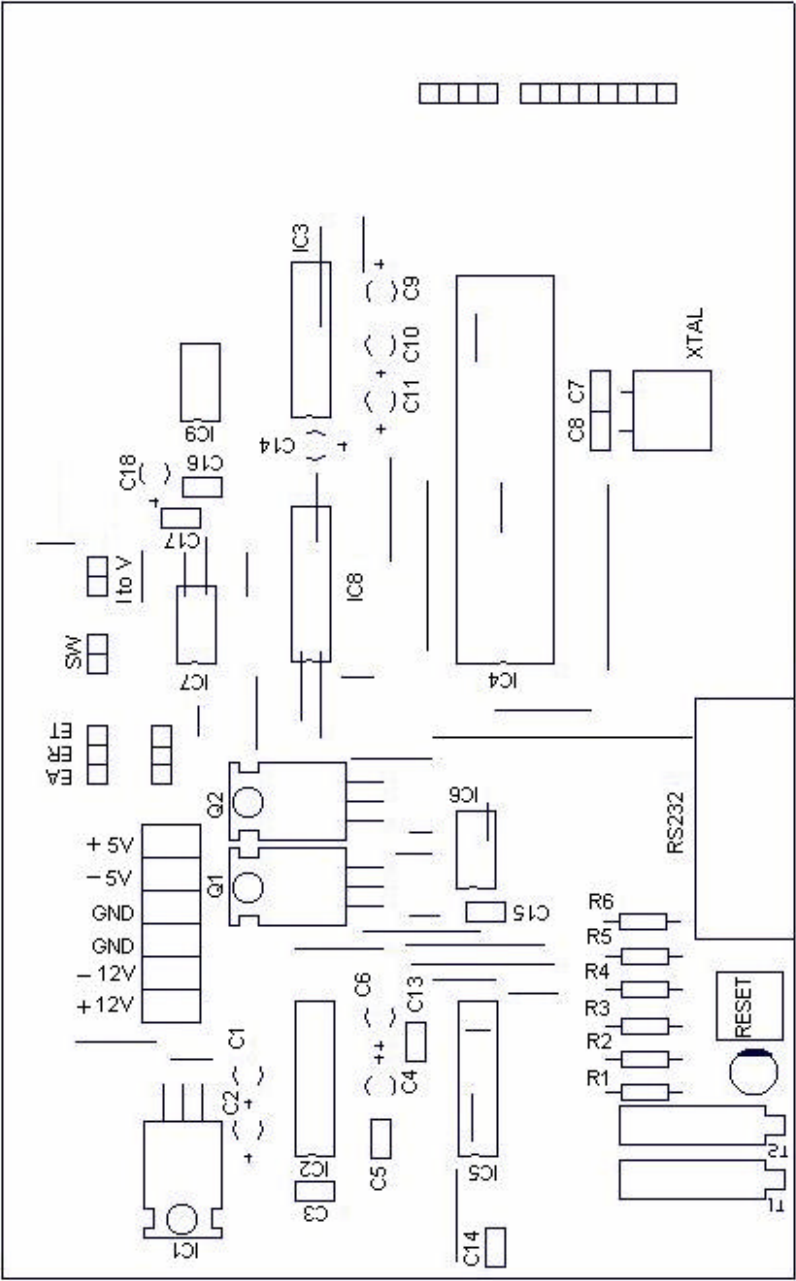


Tabla 1. Lista de componentes de la tarjeta 1

COMPONENTE	DESCRIPCION	VALOR/REFERENCIA
C1, C3, C6	Capacitor cerámico	0.1 μ F
C2, C4, C5	Capacitor cerámico	0.01 μ F
C7, C8	Capacitor electrolítico	4700 μ F – 25V
D1	Puente rectificador	8 A
D2	Diodo zener	3.3V - 1W
F1	Fusible	1A
IC1	Regulador de voltaje	LM7812
IC2	Regulador de voltaje	LM7912
IC3	Regulador de voltaje	LM7905
P1	Preajustable	5 K Ω
Q1, Q2	Transistor	2N3904
Q3	Transistor de potencia	TIP141
R1	Resistencia	1 K Ω - 1W
R2	Resistencia	2.2 K Ω -1W
R3	Resistencia	100 Ω -1W
R4	Resistencia	1 K Ω - 1W
R5	Resistencia	330 Ω -1W
R6	Resistencia	0.75 Ω - 5W
V1	Varistor	150 V

Tarjeta 2. Circuito de control del potencióstato (componentes)



Tarjeta 2. Circuito de control del potencióstato (pistas)

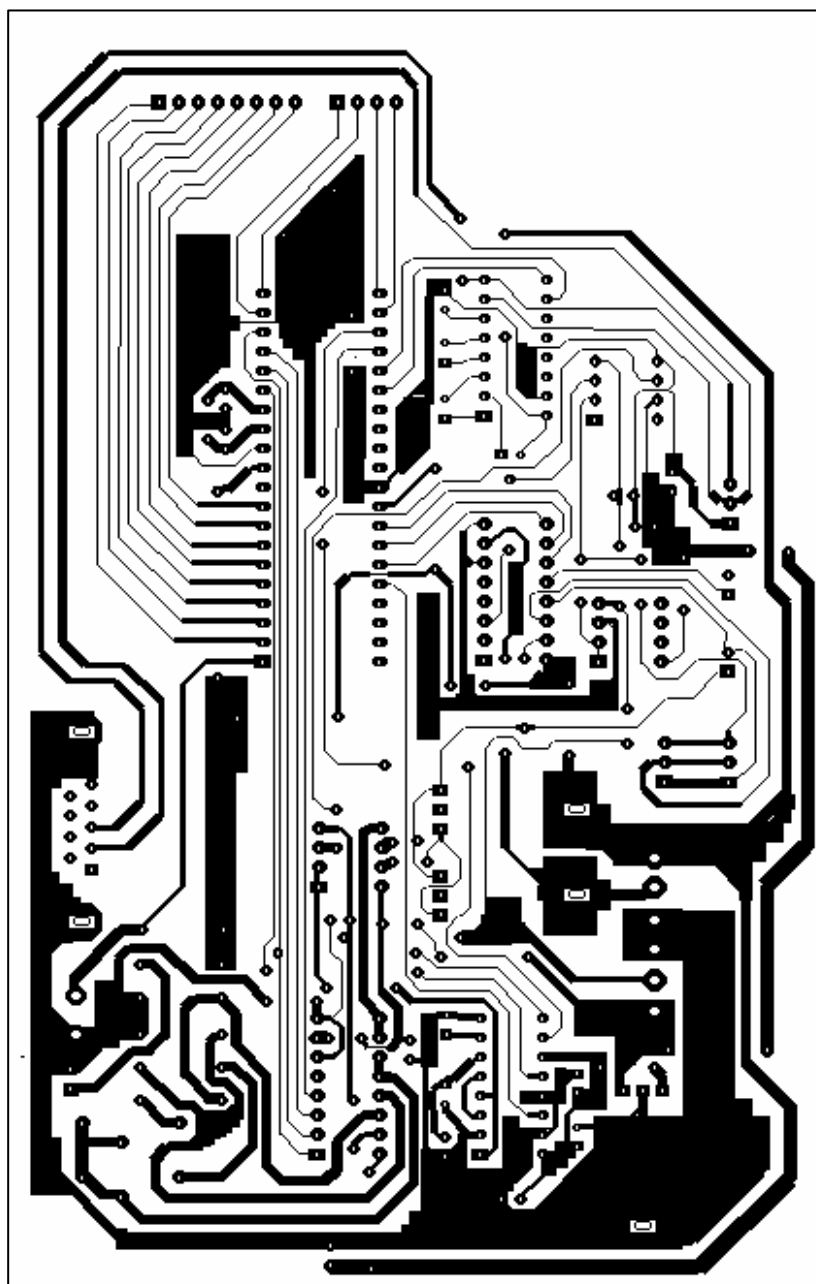
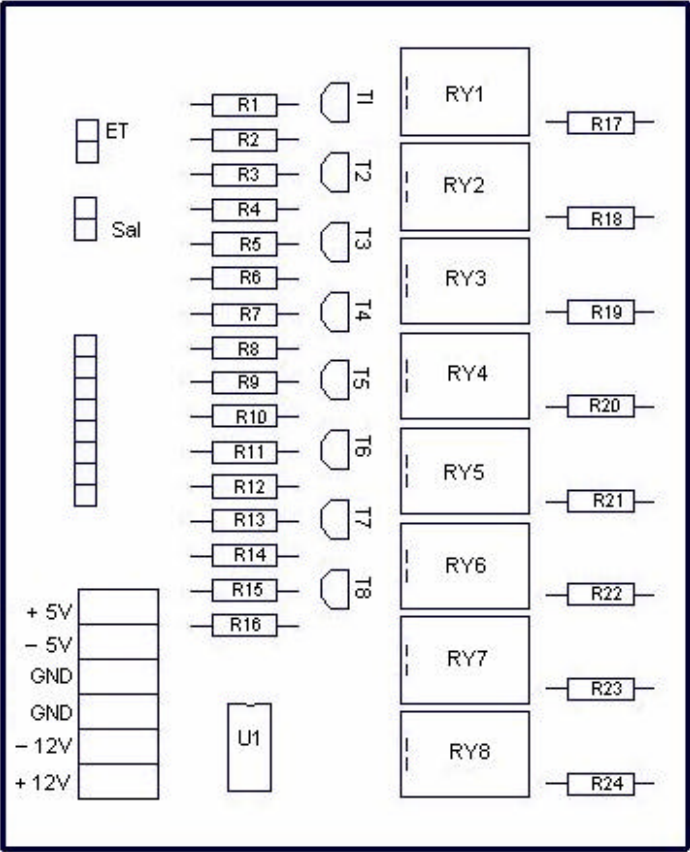


Tabla 2. Lista de componentes de la tarjeta 2

COMPONENTE	DESCRIPCIÓN	VALOR/REFERENCIA
C1	Capacitor electrolítico	100 μ F – 16V
C2	Capacitor de tantalio	10 μ F – 16V
C3, C13, C14, C16, C18	Capacitor cerámico	0.1 μ F
C4, C6, C9, C10, C11, C12, C15, C17	Capacitor de tantalio	1 μ F – 35V
C7, C8	Capacitor cerámico	20 pF
C5	Capacitor cerámico	0.01 μ F
IC1	Regulador de voltaje +5V	L7805CV
IC2	Convertidor A/D	ADS7813
IC3	MAX232	ICL232CPE
IC4	Microcontrolador	PIC16F877
IC5	Convertidor D/A	DAC714P
IC6, IC7	Amplificadores Operacionales	TL082CP
IC8	Multiplexor	CD4051B
IC9	Amplificador de instrumentación	INA128P
Q1	Transistor de potencia	TIP127
Q2	Transistor de potencia	TIP142P
R1, R2	Resistencia de precisión	100 Ω - ¼W
R3	Resistencia de precisión	10K Ω -¼W
R4	Resistencia de precisión	27K Ω - ¼W
R5	Resistencia	330 Ω -¼W
R6	Resistencia	10 K Ω - ¼W
T1, T2	Trimer	1K Ω
XTAL	Cristal de cuarzo	4 MHz

Tarjeta 3. Circuito convertidor de corriente a voltaje (componentes)



Tarjeta 3. Circuito convertidor de corriente a voltaje (pistas)

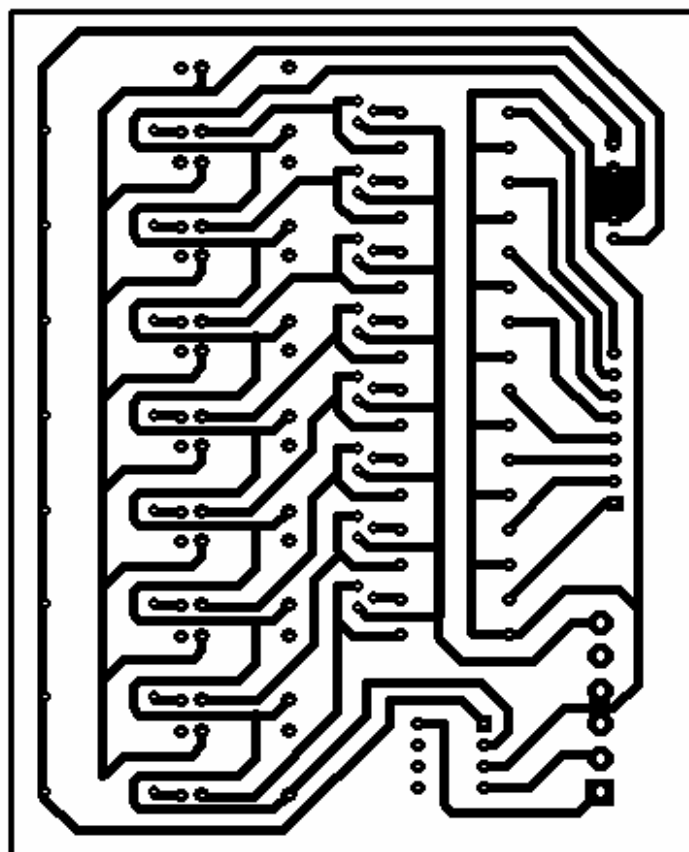
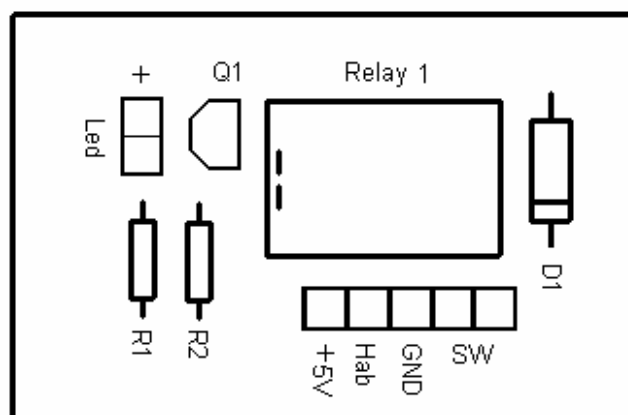


Tabla 3. Lista de componentes de la tarjeta 3

COMPONENTE	DESCRIPCION	VALOR/REFERENCIA
Q1 – Q8	Transistor	2N3904
R1, R3, R5, R7, R9, R11	Resistencia	10 K Ω - ½W
R13,R15		
R2, R4, R6, R8, R10, R12, R14,	Resistencia	2.2 K Ω -½W
R16		
R17	Resistencia de precisión	10M Ω -¼W
R18	Resistencia de precisión	1 M Ω - ¼W
R19	Resistencia de precisión	100 K Ω - ¼W
R20	Resistencia de precisión	10K Ω - ¼W
R21	Resistencia de precisión	1K Ω - ¼W
R22	Resistencia de precisión	100 Ω - ¼W
R23	Resistencia de precisión	15 Ω - ¼W
R24	Resistencia de precisión	6 Ω - ¼W
RY1 – RY8	Relé	NO. - 5 VDC
U1	Amplificador operacional	TL082

Tarjeta 4. Circuito interruptor de polarización (elementos)



Tarjeta 4. Circuito interruptor de polarización (pistas)

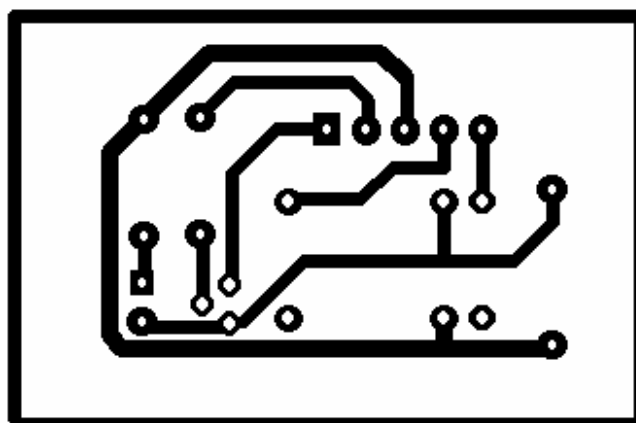
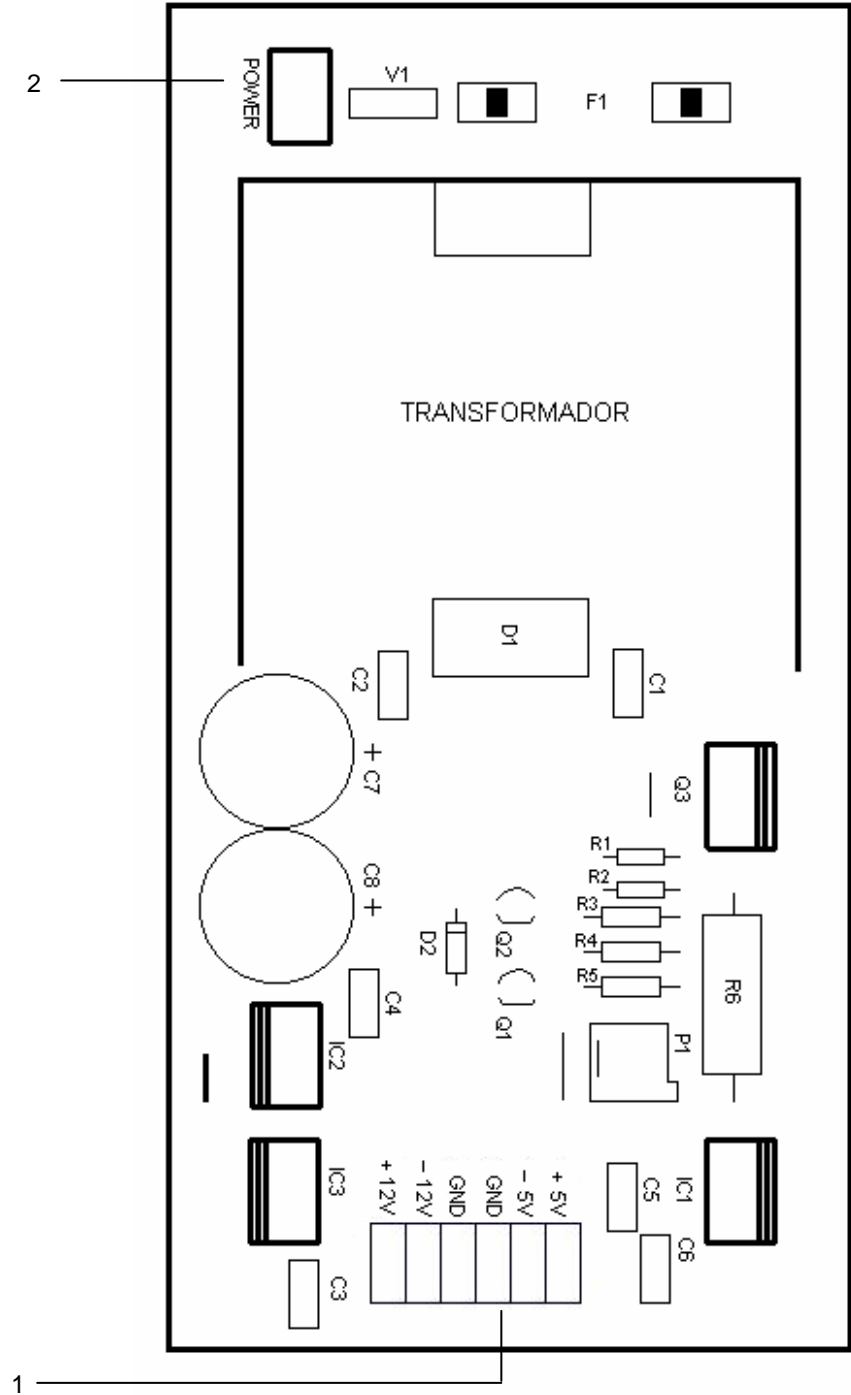


Tabla 4. Lista de componentes de la tarjeta 4

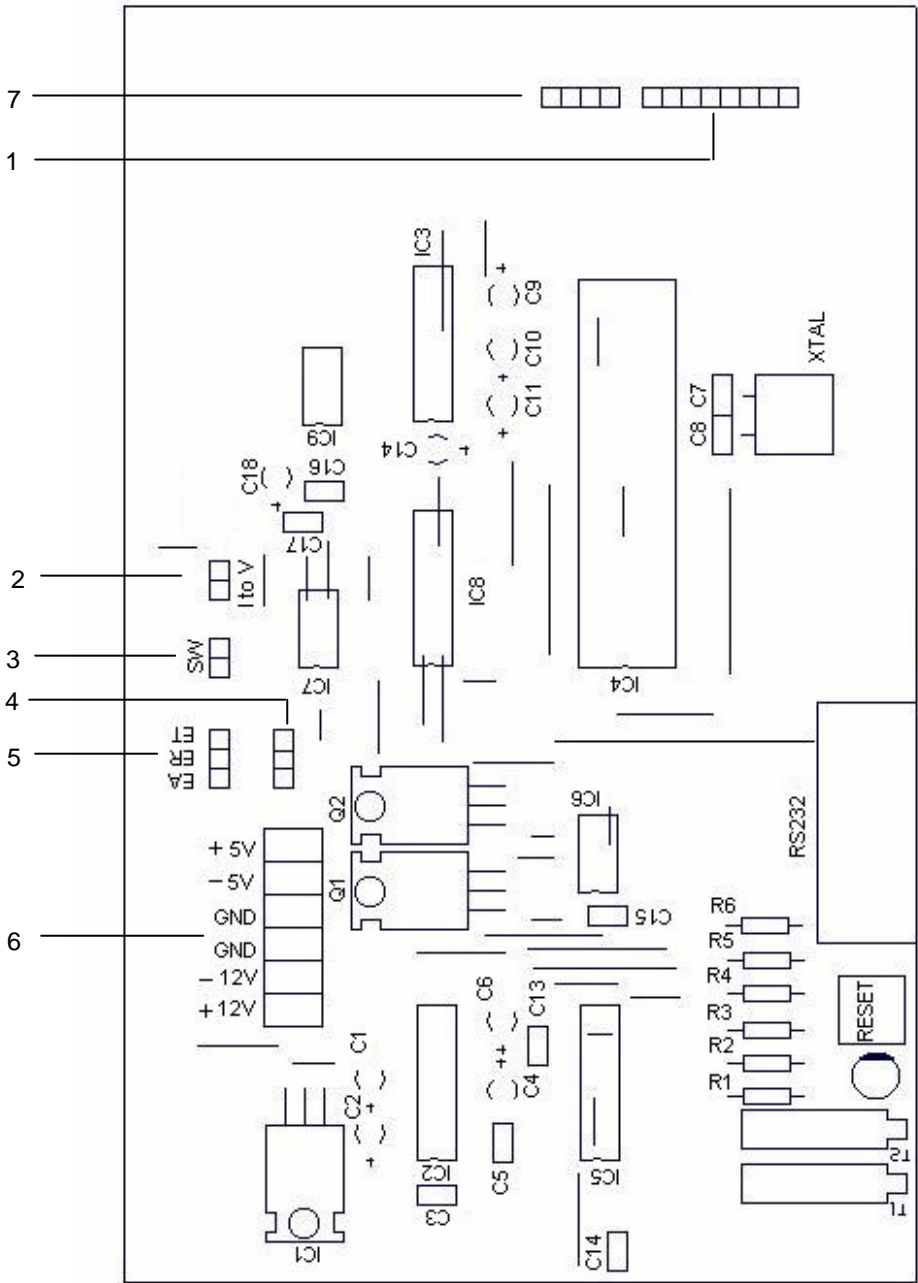
COMPONENTE	DESCRIPCION	VALOR/REFERENCIA
D1	Diodo	1N4001-¼W
Led	Led rojo	
Relay 1	Rele	NO – 5 VDC
R1	Resistencia	600 Ω - ½W
R2	Resistencia	2.4 KΩ -½W
Q1	Transistor	2N3906

ANEXO B. Guía de conexiones

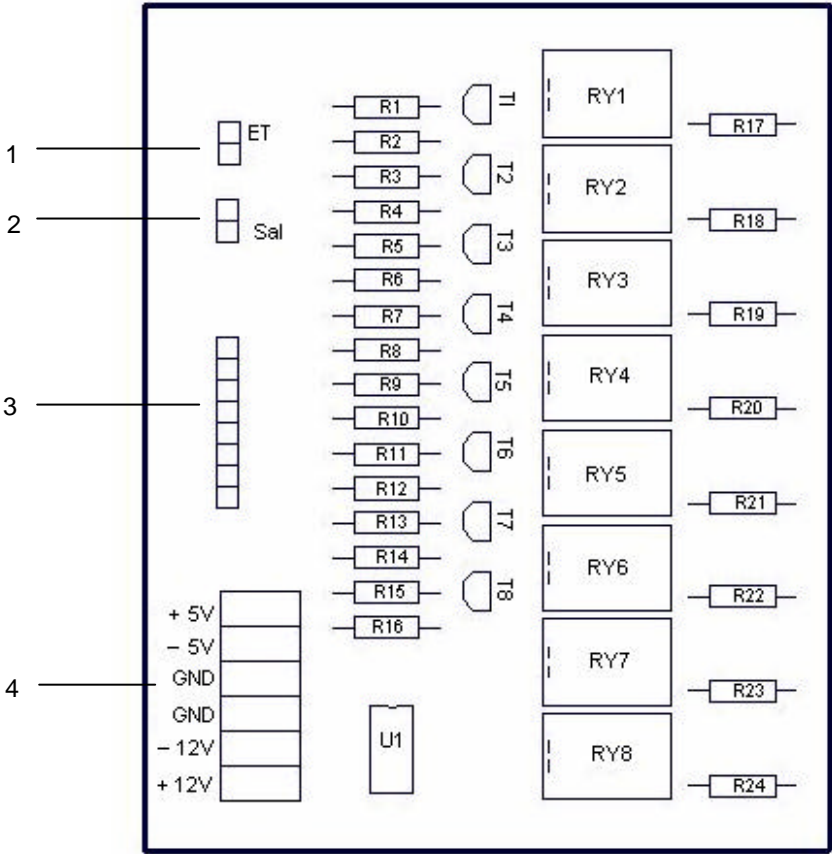
Tarjeta 1. Fuente de alimentación



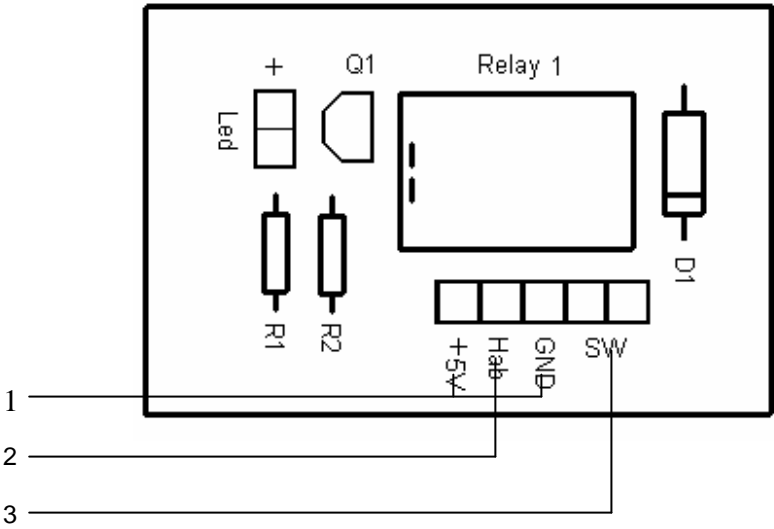
Tarjeta 2. Circuito de control del potencióstato



Tarjeta 3. Circuito convertidor de corriente a voltaje



Tarjeta 4. Circuito interruptor de polarización



Cuadro 1. Guía de conexiones

DE			A		
TARJETA	PUNTO	DESCRIPCIÓN	TARJETA	PUNTO	DESCRIPCIÓN
1	1	Salida alimentación	3	4	Alimentación
1	1	Salida alimentación	4	1	Alimentación
1	2	Alimentación	Alimentación red		
2	1	Salidas de control de los relés	3	3	R _B de los transistores
2	2	Señal del convertidor	3	2	Salida convertidor
2	3	SW	4	3	SW
2	4	ET	3	1	ET
2	5	EA, ET, ER	Conectores de los electrodos		
2	6	Alimentación	3	4	Alimentación
2	7	Salida de control del relé	4	2	R _B del transistor

ANEXO C. Paper

DESIGN OF AN INSTRUMENT FOR CORROSION ANALYSIS

M.Gómez¹, J. Rivera, F¹. Almeraya-C², C. Gaona-T² and A. Martínez-V².

ABSTRACT

In this work is presented the design of an instrument for corrosion analysis using electrochemical techniques, the instrument is divided in a potentiostat, galvanostat and zero resistance ammeter. This equipment has the capacity to perform at least five different electrochemical techniques. The instrument is connected to a personal computer through RS-232 port and the software for control and monitoring was developed in LabView. This work is divided in three major parts; analog design, digital design and acquisition software. Right now this instrument is used in corrosion measurements. In the mechanic engineering faculty at Instituto Tecnológico de Chihuahua (México).

1. INTRODUCTION

Chemical degradation of metal by its environment is called corrosion. The corrosion of a metal or material is its deterioration or destruction as a result of complex interaction between it and its environment under particular circumstances of its exposure.

The major concern of institutions for superior education is the lack of equipment for laboratories, which help the theoretical teaching with practical experiments in order to get human resources with a best professional preparation.

To study corrosion, different techniques exist, the traditional is "the weight-loss" but not sophisticated equipment is necessary, the problem is, that observation time is long and high attention is required to get good accuracy. With the electrochemical techniques the experiment time is short and we have information in real time, but, in this case the required equipment is expensive and not found in the laboratories of our country educational institutions.

The idea of this work is to support the metal corrosion studies using electrochemical techniques. The designed instrument includes a potentiostat, galvanostat and zero resistance ammeter (P/G/ZRA).

1.1 Electrochemical corrosion.

When a metal is immersed in a given solution, an electrochemical reaction, characteristics of the metal-solution interface occur at the surface of the metal, causing the metal to corrode. This reaction creates an electrochemical potential, called corrosion potential or

open circuit potential (measured in millivolt) at the metal solution interface. Since the corrosion potential is determined by the specific chemistry of the system [3].

1.2 Corrosion potential measurement.

The corrosion potential (E_{corr}) of the metal-solution interface cannot be directly measured. E_{corr} can only be compared to the potential of a known reference system and can be measured indirectly [3].

The figure 1 shows how can be measured E_{corr} with a reference electrode (RE) placed into the same solution as the metal under test or working electrode (WE).

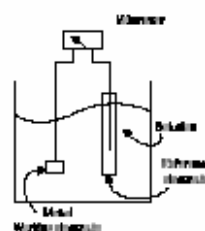


Figure 1.- E_{corr} Measurement of a metal-solution system.

A voltmeter is used to measure E_{corr} , connecting from the positive terminal to WE and from the negative terminal to RE of a voltmeter, a high input impedance is required ($>10^9$ ohms). The most useful reference electrode is the Saturated Calomel Electrode.

1.3 Potential and current.

Potential and current are the two fundamental variables in any electrochemical experiment. The potential can be a product of the natural reaction between the metal and the solution or the potential can be imposed by an external

¹ División de Estudios de posgrado e Investigación del Instituto Tecnológico de Chihuahua, Ave. Tecnológico 2909, 31310, Chihuahua Chih. Mex. jrivera@itch.edu.mx

² Centro de Investigación en Materiales Avanzados, Miguel de Cervantes 120, 31109, Chihuahua Chih. Mex.

instrument. When an instrument expends electrical energy to shift metal from its natural corrosion potential, it performs the work of stimulating either the oxidation or reduction reactions.

As an oxidation or reduction reaction predominates on the metal surface, a flow of electrons (either to or from the metal) gives rise to a current. The current can be related to the rate of the electrochemical reaction, since it is measured of the electrons number that flow in a given period of time.

For corrosion works, exists polarity conventions that allow to associate a measured potential or current with either an oxidation or a reductions reaction. The convention is shown in the figure 2, that positive potential of E_{corr} will accelerate the oxidation reaction. The current resulting from the oxidation is called anodic current and is displayed with a positive polarity. Potential negative of E_{corr} will accelerate the reduction reaction. The current resulting from the reduction is called cathodic current and is displayed with a negative polarity [3]



Figure 2.- Corrosion conventions for plotting potential vs. current potential.

1.4 Electrochemical cell.

Figure 3 represents the arrangement cell used in a typical electrochemical corrosion measurement. The cell includes the metal specimen (commonly called the working electrode, WE) and the solution in which the specimen is to be tested. The reference electrode (RE) contacts the solution to the bridge tube, a compartment filled with test solution which provides optimum positioning of the RE. Finally, a counter electrode or auxiliary electrode (AE), sometimes two electrodes are used to supply the current flowing at the working electrode during the test.

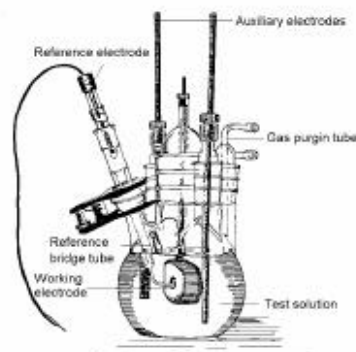


Figure 3. This is a typical electrochemical corrosion cell [3].

Several types of corrosion cells are commercially available, in our instrument we are using a model as is showed in the figure 4.

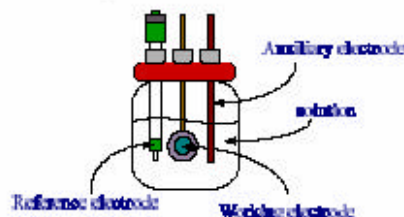


Figure 4. Electrochemical cell used in this instrument.

1.4 Electrical model of an electrochemical cell.

The circuit equivalent is showed in the figure 5 and it represents an electrochemical cell connected to an instrument capable of controlling the potential between the RE and WE. The solution resistance is present between the AE and RE. In all electrochemical cells, there is some resistance between the tip of the RE and the outside of the double layer, this resistance is called uncompensated resistance.

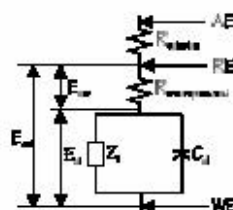


Figure 5. Model for Electrochemical cell.

As the current flows through the electrochemical cell, a potential is developed across the uncompensated resistance. This potential is calculated by:

$$E_{err} = iR_u \quad (1)$$

When the uncompensated resistance is high or the current becomes large a significant error may occur. Using this simple model, the potential control is related to the potential across the double layer and the uncompensated resistance by the following equation:

$$E_{ctr} = E_{dl} + E_{err} \quad (2)$$

Different methods had been development to eliminate E_{err} from the equation 2, to produce the ideal equation:

$$E_{ctr} = E_{corr} \quad (3)$$

The most important of these methods are:

- Cell Design.** Careful cell design can minimize the R_u and thus minimize E_{err} .
- After the scan correction.** If the R_u is measured before the scan begins, the potential value for each data point on the plot can be adjusted using the calculated E_{err} value.
- Positive Feedback.** At the beginning of the experiment, you make a manually or a computer controlled feedback adjustment on the potentiostat. Once the adjustment is made, the potentiostat will automatically correct the applied potential as dictated by the measured current.
- Current Interrupt.** In many cases this is the best solution to the R_u problem. The experiment is interrupted for a very short time (less than 200 μ S). At each interruption, a new E_{err} value is determined and E_{ctr} accordingly corrected so that the desired E_{dl} is maintained [4].

2. P/G/ZRA DESIGN.

The instruments more used in electrochemical tests are the potentiostat (P) and the galvanostat (G). The potentiostat is an instrument that its objective is to control the potential difference between the WE and RE by the application of current via the WE and AE. The galvanostat is an instrument to control the current across AE and WE in one constant value independent of cell impedance.

The zero resistance ammeter (ZRA) is an instrument used to measure the current across the cell.

2.1 Analog design.

For the potentiostat we are using a basic configuration "adder potentiostat", presented by Allen [5]. The figure 6 illustrates this circuit, the control amplifier is a high-voltage/high-current operational amplifier suitable for driving a wide variety of high power loads [6]. The voltage follower is a monolithic operational amplifier connected as unit-gain non-inverting amplifier its input impedance is typically 10^{12} ohms [7], this way can be used to measure E_{corr} because is under recommendation of the section 1.2.

From the figure 6, assuming an ideal operational E_{ref} is:

$$e_{ref} = -\frac{R_f}{R_i} e_i \quad (4)$$

If $R_f = R_i$ then:

$$E_{ref} = -e_i \quad (5)$$

Considering that E_{err} is eliminated by the design of the cell, section 1.4, then:

$$E_{corr} = E_{ref} = -e_i \quad (6)$$

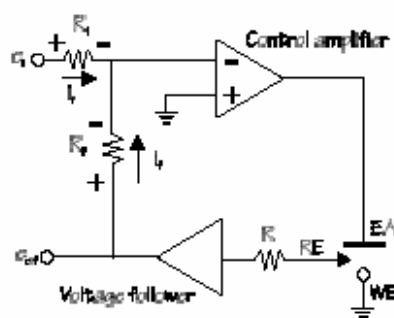


Figure 6. A full potentiostat based on an adder control amplifier.

The galvanostat basically is a current source controlled by voltage [5]. In a galvanostatic experiment the most important thing is to supply a constant current across the cell and monitoring E_{corr} . A simple configuration of the galvanostat is showed in the figure 7, the operational amplifier and their characteristics are described above [6].

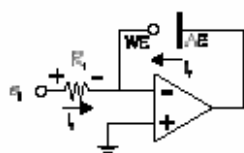


Figure 7. Galvanostat based in an inverter configuration.

This galvanostat is based in an inverter configuration in which the feedback resistance R_f has been replaced for the cell, then the i_f is calculated by the following equation:

$$i_f = -\frac{e_i}{R_i} \quad (7)$$

The zero resistance ammeter is used for current measurement without supply external voltage to cell. The circuit that we are using is a current to voltage converter and is showed in the figure 8. The V_o is:

$$V_o = -i_f R \quad (8)$$

If assuming $i = i_i = i_f$

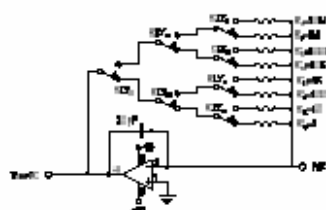


Figure 8. Circuit for current measuring based in a current to voltage converter.

This circuit has eight current ranges, using relays we can choose the desired range, see table 1, the resistors were calculated using the equation 8, considering the output voltage $V_o \pm 1V$ as maximum value because will be supplied to an analog to digital converter (ADC).

Table 1. Current measuring ranges.

Value of R	Current range
10 MΩ	± 10 nA to ± 100 nA
1 MΩ	± 100 nA to ± 1 μA
100 KΩ	± 1 μA to ± 10 μA
10 KΩ	± 10 μA to ± 100 μA
1 KΩ	± 100 μA to ± 1 mA
100 Ω	± 1 mA to ± 10 mA
10 Ω	± 10 mA to ± 100 mA
1 Ω	± 100 mA to ± 1 A

Using relays the potentiostat, the galvanostat and the ZRA were integrated in one single instrument as is showed in the figure 9.

The eight darlington transistors array receive the control word from a microcontroller to make the instrument configuration accordingly with the electrochemical test.

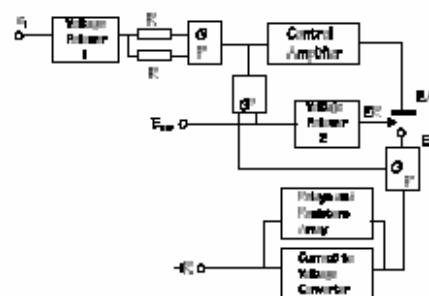


Figure 9. Block diagram of the P/G/ZRA

2.2. Digital design.

A block diagram of digital parts is showed in the figure 10. This system is based in the microcontroller of Intel [8], one digital to analog converter and one analog to digital converter [9].

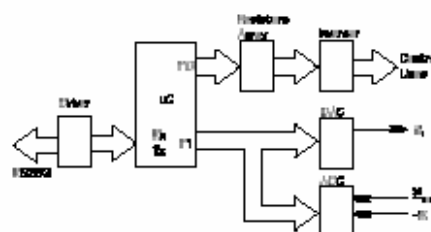


Figure 10. Block diagram of P/G/ZRA digital part.

The major functions of this microcontroller are:

- To Configure the instrument as potentiostat, galvanostat or ZRA.
- To receive and to transmit data either to or from the personal computer.
- To Program the voltage for the potentiostat e_i by the DAC.

- d) To measure the E_{corr} and Current across the cell, using the ADC.

The program for the microcontroller work was developed in C language using a compiler for C51 from franklin software inc. [11, 12], this program establishes communication with the computer software of were receive instructions of the experiment conditions that will be ejected, this will be described in the following section.

2.3. Software developed.

The monitoring and control of the variables was developed on a personal computer under windows95 using a LabView™ 4.0 [10].

When the software is run by first time, the user has to make the serial port configuration. After that we can chose any of following six electrochemical experiments: potentiodynamic, cycle polarization, potentiostatic, galvanodynamic, galvanostatic and voltage and current measuring, furthermore it creates a file to record all experiment data for future analysis. The main panel is showed in the figure 11.



Figure 11. Main panel of developed software with instructions in Spanish.

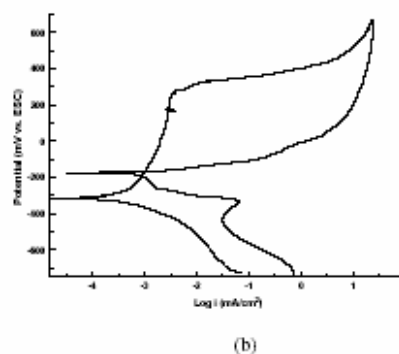
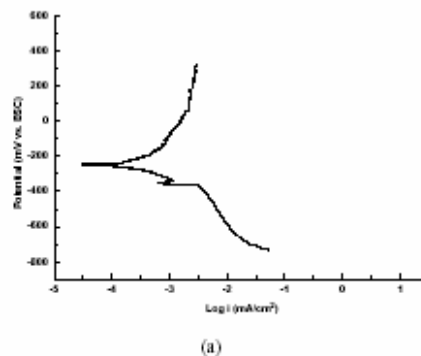
The instrument work for each electrochemical experiment in 304 stainless steel in the presence of NaCl to the 3.5%, as follows:

Potentiodynamic. When the user chooses this technique another panel is open and the initial voltage, final voltage and the swiped time have to be programmed. With this data a discrete ramp is generated and supplied by the potentiostat to a cell. For each voltage supplied the current across the cell is measured with the ZRA and his logarithmic value is evaluated, both data voltage and logarithmic current are saved in a text file for future analysis and at the same time a plot is generated in the computer. The resulting graphic is showed in the figure 12a.

Cyclic polarization. Is similar to potentiodynamic but instead a ramp one triangle signal is generated and the resulting graphic is showed in the figure 12b and the data is recorded in a text file.

Potentiostatic. In this technique just a constant voltage is programmed and the variation of the current across the cell in reference to the time is registered. When the user chooses this option in a special panel will program the voltage, number of samples and the time between sample. The result is showed in the figure 12c. All the data is recorded in a text file.

Galvanodynamic. When this technique is selected in a panel will be programmed the initial current, the final current and the swiped time and one discrete current ramp is generated and supplied to the cell with the galvanostat. For each current supplied one E_{corr} is measured, all the experiment data are recorded in a text file and at the same time a graphic of I vs. E_{corr} is generated, the result is showed in the figure 12d.



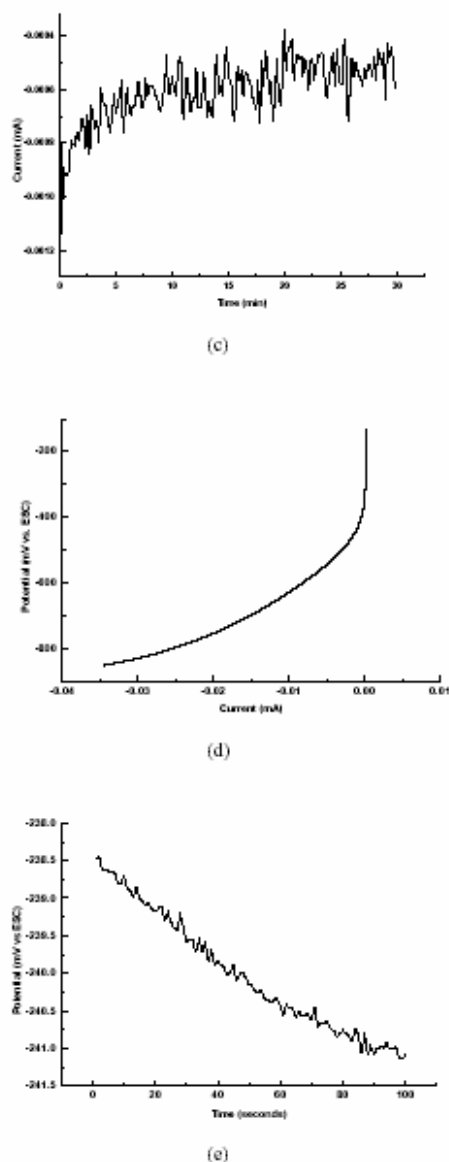


Figure 12. Graphic result of each test a) Potentiodynamic, b) Cyclic polarization, c) Potentiostatic d) Galvanodynamic, e) Galvanostatic

Galvanostatic. In this technique just a constant current is programmed and the variation of the E_{corr} in reference to the time is registered. When the user chooses this option in a special panel will program the current value, number of the samples and the time between sample. The result is showed in the figure 12e. All the data is recorded in a text file.

Voltage and current. The instrument has the capability of monitoring the corrosion voltage E_{corr} and the current across the cell in reference to the time without supplying external excitation. A panel with two curves E_{corr} vs. time and current vs. time at the same time is showed. All data is saved in a text file.

3. INSTRUMENT CHARACTERISTICS.

The major functions of this instrument are two: to control the voltage supplied to the cell and measure the current variation (potentiostat) or control the current supplied to the cell and measure the E_{corr} (galvanostat). But until now the characteristics of precision and accuracy are unknown.

To get the instrument characteristics the method of static calibration was used. [13,14].

The reference instruments were:

Multimeter FLUKE 45

Power supply PM2811 Phillips.

Environmental temperature of 24°C.

The figures 13 and 14 show the connections using the reference instruments in order to get characteristics of voltage and current measuring.

To test the current and voltage control of our instrument was used a cell as showed the figure 14 with the following characteristics:

WE Stainless Steel nail.

AE Graphite bar.

RE Silver/Chlorure silver

Solution: Sodium chloride.

The figure 15 shows the connections. For voltage control verification with the computer was selected a cyclic polarization and a discrete signal of voltage triangular was generated in the same time the programmed voltage (supplied by the instrument) and the voltage displayed in the multimeter were registered.

To current control verification an experiment similar to control voltage verification was made but with a current supplied.

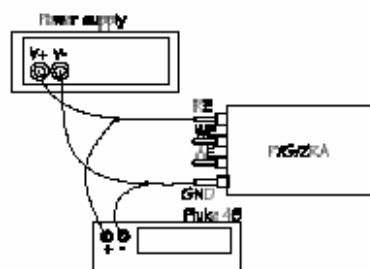


Figure 13. Voltage measuring.

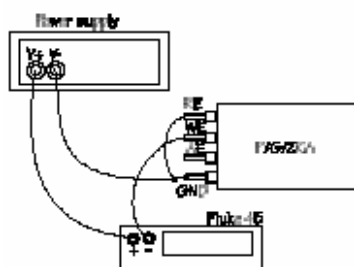


Figure 14. Current measure

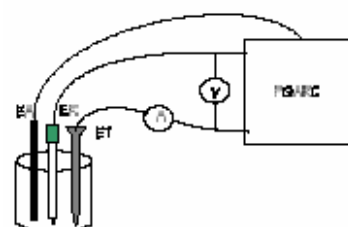


Figure 15. Cell connections for voltage and current control verification.

After the analysis of the gathered data of the experiments described before we got the following features for the P/G/ZRA:

Cell connection 2 or 3 float electrodes.

Working electrode:

Resistors for current measure of

1ohm to 10Mohm

Current supply 10nA to 1A

Auxiliar electrode:

Output voltage $\pm 15V$.

Output Current 2A.

Reference electrode:

Input impedance 10^{12} ohms.

Input capacitance 1.5pf.

Direct current Polarization:

Voltage

Voltage range $\pm 1.3V$.

Resolution 100 μV (16 bits).

% Not linearity $\pm 0.5026\%$

Sensitivity 0.9908.

Current

Current range $\pm 25mA$.

Resolution 100nA (16 bits)

Direct current swiped:

Minimum base time 10mseg.

Maximum base time 10^5 seg

Minimum swiped amplitude 100 μV /100nA

Maximum swiped amplitude 2.0V/25mA

Interface:

Serial port. RS-232.

Baud rate 9600.

Data bit 8

Stop bit 1

Parity no

Others:

Text file generation.

Autorange in current measure.

Capability to print results.

Capability of to data analysis.

4. CONCLUSIONS.

The designed instrument has the capability to be used in the major electrochemical techniques of direct current.

We get a potentiostat and the galvanostat in a single instrument and optimized with a minimum of components.

The equipment is an economical instrument that provides extensive teaching and research capabilities, with the following advantages:

- We have a potentiostat and galvanostat in a single instrument.
- The data of the current measured is saved after having its logarithm value. With this futures analysis are easier.
- All the experiment data is saved in a text file and can be opened with different softwares likes excel, origin, lotus, etc.
- The instrument can be reproduced because we have all the required information.
- All the technical support is near to update de instrument in hardware and software each time that will be necessary.

With an instrument of these features several experiment can be developed in the laboratories of any Institution of superior education. This way we can contribute to the teaching materials and the students will have a best preparation seeing and practicing the theoretical concepts.

This equipment will have a practical manual and will be introduced to the Tecnológicos System across the CRODE (Centro regional de optimización y desarrollo de equipo).

5. ACKNOWLEDGMENTS.

This work has been supported by FO-SIVILLA (SISTEMA DE INVESTIGACION FRANCISCO VILLA) under grant 9605051.

The technical support of the personnel of the corrosion laboratory of CIMAV (Centro de Investigación en Materiales Avanzados).

Thanks to CRODE (Centro Regional de Optimización y Desarrollo de Equipo) for the help to introduce this equipment to the education Institutions.

José Briones Cordero, thank you very much for your help, ('Centro de idiomas del Instituto Tecnológico de Chihuahua')

6. REFERENCES

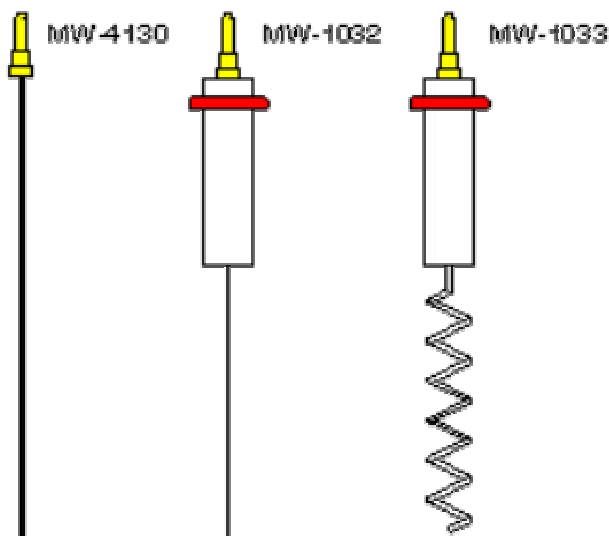
1. Annual Book of ASTM Standards'. Section 3. G15-93. Metal and Test Methods and Analytical Procedures. Vol. 3.02 Wear and Erosion; Metal corrosion. (Philadelphia, P.A.), USA., 59-62,1993.

2. Ávila J. Genescá J. 'Más allá de la herrumbre', (México D.F.), fondo de cultura económica S.A. de C.V., 1986.
3. EG&G Princeton Applied Research, Electrochemical Instruments Division, "Application note Corr-4: Electrochemistry and corrosion overview and techniques", 1-4,
4. EG&G Princeton Applied Research, Electrochemical Instruments Division, "Application note Corr-4: Potential Error Correction (iR Compensation)", 1-3,
5. Allen J. Bard and Larry R. Faulkner, Electrochemical Methods Fundamentals an applications, (John Wiley & Sons, New York), 563-569,
6. Burr Brown Corporation, 1994.
7. National Semiconductor, National Operational Amplifiers Databook (Santa Clara), 2-33 to 2-45, 1995.
8. "Embedded Microcontrollers and Processors". Intel, Vol.I. 1992.
9. Maxim Integrated Products, Product Data Sheet, 1997 edition.
10. Lisa K. Wells The LabView Student Edition, User's Guide,. National Instruments. Prentice Hall, 1995.
11. Franklin S.I., C-compiler 51, User's Guide 3.89, Franklin Software Inc. 1988, 1989.
12. Shultz T., "C and the 8051 Programming and Multitasking", Prentice Hall 1993.
13. Doebelin E.O., Measurement System Applications and Design, (McGraw-Hill Inc., 1990)
14. Bolton W., Newness Instrumentation & Measurement, Pocket Book, 1991.

ANEXO D. Especificaciones de los electrodos

BAS Platinum Wire Auxiliary Electrodes

Figura 1. Electrodo de platino (BAS, MW-1032)



Platinum wire auxiliary electrodes (0.5 mm diameter) are available in a variety of lengths. The electrode of choice depends upon the type of BAS cell (and the experiment), as listed below. Each platinum wire terminates in a gold-plated brass connector. Electrical connection to this pin can be made using either an alligator clip or a 0.040" gold-plated connector (MF-2000).

MW-1032	Platinum Wire Auxiliary Electrode (7.5 cm), with gold-plated connector, mounted in CTFE cylinder. For use with the C-2 and the C-3 Cell Stands .
MW-1033	Coiled Platinum Wire Auxiliary Electrode (23 cm), with gold-plated connector, mounted in CTFE cylinder. For use with the RDE-1, the RDE-2 , and the bulk electrolysis cell .
MW-4130	Platinum Wire Auxiliary Electrode (6 cm) with gold-plated connector for use with the C1 Cell Stand, the VC-2 Voltammetry Cell , and in the Low Volume Cell for the C-2 Cell Stand.

Item(s) from the Metrosensor Catalog:

6.0733.100	LL Ag/AgCl reference electrode, SGJ, Metrohm socket B				
Technical specifications					
Shaft length	125 mm		Shaft material	glass	
Length to SGJ	86 mm		Electrode plug-in head	Metrohm socket B	
Shaft diameter	12 mm		Electrode ground joint	SGJ 14/15	
Min. immersion depth	5 mm		Temperature range	0 ... 80 °C	
			Reference electrode		
			Diaphragm	ceramic pin	
			Reference electrolyte	c(KCl) = 3 mol/L	
			Diaphragm flow rate	5 ... 15 mL/h	
			Diaphragm resistance	0.4 ... 0.9 kOhm	
			Reference element	LL system	
			Reference element resistance	3 kOhm	

Figura 2. Electrodo de plata / cloruro de plata (Metrohm, 6.0733.100)



ANEXO E. PIC16F877



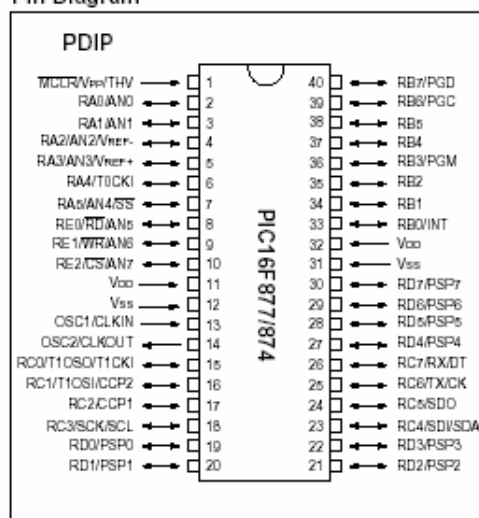
PIC16F87X

28/40-pin 8-Bit CMOS FLASH Microcontrollers

Microcontroller Core Features:

- High-performance RISC CPU
- Only 35 single word instructions to learn
- All single cycle instructions except for program branches which are two cycle
- Operating speed: DC - 20 MHz clock input
DC - 200 ns instruction cycle
- Up to 8K x 14 words of FLASH Program Memory,
Up to 368 x 8 bytes of Data Memory (RAM)
Up to 256 x 8 bytes of EEPROM data memory
- Pinout compatible to the PIC16C73/74/76/77
- Interrupt capability (up to 14 internal/external interrupt sources)
- Eight level deep hardware stack
- Direct, indirect, and relative addressing modes
- Power-on Reset (POR)
- Power-up Timer (PWRT) and
Oscillator Start-up Timer (OST)
- Watchdog Timer (WDT) with its own on-chip RC oscillator for reliable operation
- Programmable code-protection
- Power saving SLEEP mode
- Selectable oscillator options
- Low-power, high-speed CMOS FLASH/EEPROM technology
- Fully static design
- In-Circuit Serial Programming™ via two pins
- Only single 5V source needed for programming
- In-Circuit Debugging via two pins
- Processor read/write access to program memory
- Wide operating voltage range: 2.0V to 5.5V
- High Sink/Source Current: 25 mA
- Commercial and Industrial temperature ranges
- Low-power consumption:
 - < 2 mA typical @ 5V, 4 MHz
 - 20 µA typical @ 3V, 32 kHz
 - < 1 µA typical standby current

Pin Diagram



Peripheral Features:

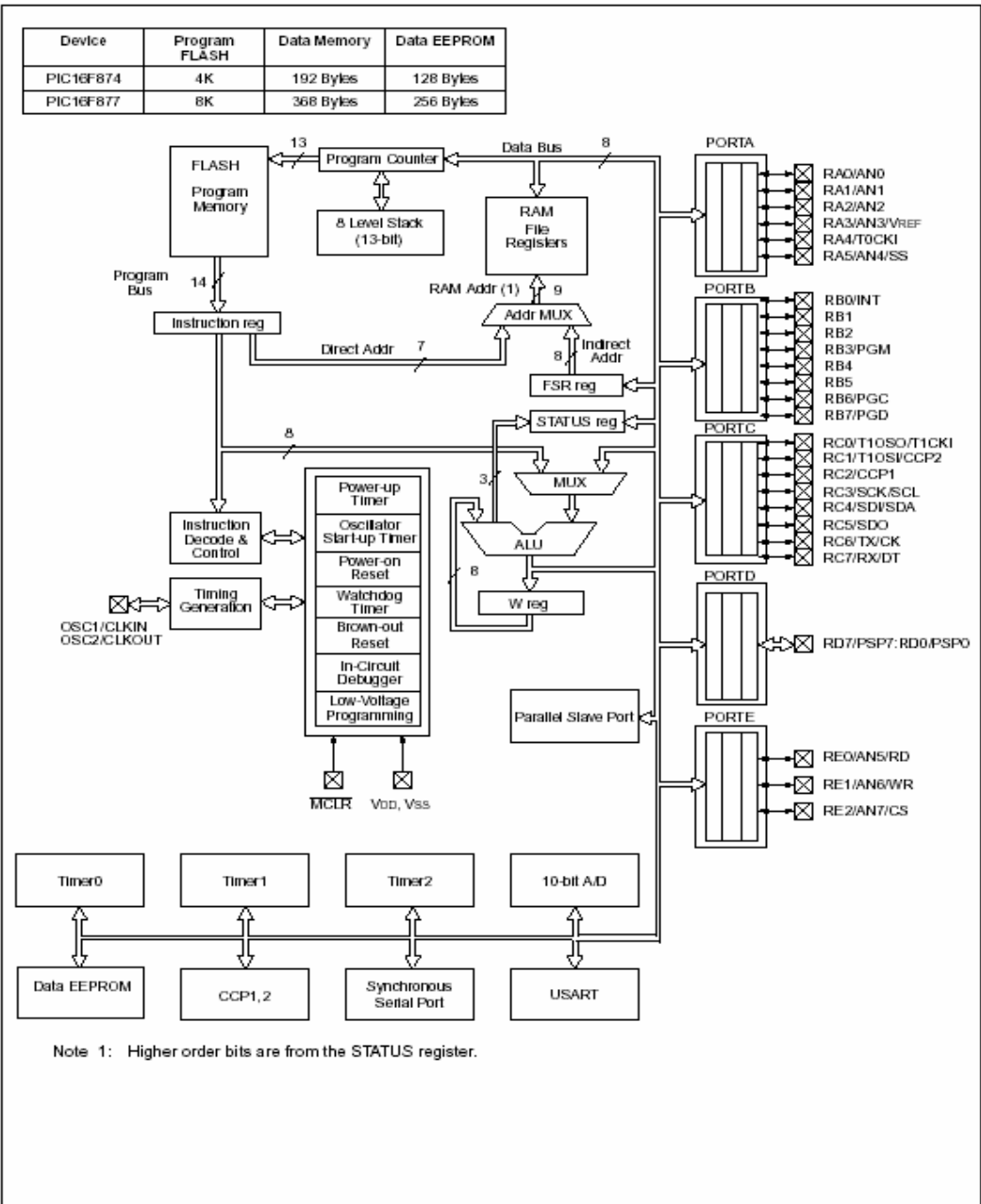
- Timer0: 8-bit timer/counter with 8-bit prescaler
- Timer1: 16-bit timer/counter with prescaler, can be incremented during sleep via external crystal/clock
- Timer2: 8-bit timer/counter with 8-bit period register, prescaler and postscaler
- Two Capture, Compare, PWM modules
- Capture is 16-bit, max. resolution is 12.5 ns, Compare is 16-bit, max. resolution is 200 ns, PWM max. resolution is 10-bit
- ★ 10-bit multi-channel Analog-to-Digital converter
- ★ Synchronous Serial Port (SSP) with SPI™ (Master Mode) and I²C™ (Master/Slave)
- ★ Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter (USART/SCI) with 9-bit address detection
- Parallel Slave Port (PSP) 8-bits wide, with external RD, WR and CS controls (40/44-pin only)
- Brown-out detection circuitry for Brown-out Reset (BOR)

PIC16F87X

Key Features PICmicro™ Mid-Range Reference Manual (DS33023)	PIC16F873	PIC16F874	PIC16F876	PIC16F877
Operating Frequency	DC - 20 MHz	DC - 20 MHz	DC - 20 MHz	DC - 20 MHz
Resets (and Delays)	POR, BOR (PWRT, OST)	POR, BOR (PWRT, OST)	POR, BOR (PWRT, OST)	POR, BOR (PWRT, OST)
FLASH Program Memory (14-bit words)	4K	4K	8K	8K
Data Memory (bytes)	192	192	368	368
EEPROM Data Memory	128	128	256	256
Interrupts	13	14	13	14
I/O Ports	Ports A,B,C	Ports A,B,C,D,E	Ports A,B,C	Ports A,B,C,D,E
Timers	3	3	3	3
Capture/Compare/PWM modules	2	2	2	2
Serial Communications	MSSP, USART	MSSP, USART	MSSP, USART	MSSP, USART
Parallel Communications	—	PSP	—	PSP
10-bit Analog-to-Digital Module	5 input channels	8 input channels	5 input channels	8 input channels
Instruction Set	35 Instructions	35 Instructions	35 Instructions	35 Instructions

PIC16F87X

FIGURE 1-2: PIC16F874 AND PIC16F877 BLOCK DIAGRAM



PIC16F87X

TABLE 1-2 PIC16F874 AND PIC16F877 PINOUT DESCRIPTION

Pin Name	DIP Pin#	PLCC Pin#	QFP Pin#	I/O/P Type	Buffer Type	Description
OSC1/CLKIN	13	14	30	I	ST/CMOS ⁽⁴⁾	Oscillator crystal input/external clock source input.
OSC2/CLKOUT	14	15	31	O	—	Oscillator crystal output. Connects to crystal or resonator in crystal oscillator mode. In RC mode, OSC2 pin outputs CLKOUT which has 1/4 the frequency of OSC1, and denotes the instruction cycle rate.
MCLR/VPP/THV	1	2	18	I/P	ST	Master clear (reset) input or programming voltage input or high voltage test mode control. This pin is an active low reset to the device.
RA0/AN0	2	3	19	I/O	TTL	<p>PORTA is a bi-directional I/O port.</p> <p>RA0 can also be analog input0</p> <p>RA1 can also be analog input1</p> <p>RA2 can also be analog input2 or negative analog reference voltage</p> <p>RA3 can also be analog input3 or positive analog reference voltage</p> <p>RA4 can also be the clock input to the Timer0 timer/counter. Output is open drain type.</p> <p>RA5 can also be analog input4 or the slave select for the synchronous serial port.</p>
RA1/AN1	3	4	20	I/O	TTL	
RA2/AN2/VREF-	4	5	21	I/O	TTL	
RA3/AN3/VREF+	5	6	22	I/O	TTL	
RA4/T0CKI	6	7	23	I/O	ST	
RA5/SS/AN4	7	8	24	I/O	TTL	
RB0/INT	33	36	8	I/O	TTL/ST ⁽¹⁾	<p>PORTB is a bi-directional I/O port. PORTB can be software programmed for internal weak pull-up on all inputs.</p> <p>RB0 can also be the external interrupt pin.</p> <p>RB3 can also be the low voltage programming input</p> <p>Interrupt on change pin.</p> <p>Interrupt on change pin.</p> <p>Interrupt on change pin or In-Circuit Debugger pin. Serial programming clock.</p> <p>Interrupt on change pin or In-Circuit Debugger pin. Serial programming data.</p>
RB1	34	37	9	I/O	TTL	
RB2	35	38	10	I/O	TTL	
RB3/PGM	36	39	11	I/O	TTL	
RB4	37	41	14	I/O	TTL	
RB5	38	42	15	I/O	TTL	
RB6/PGC	39	43	16	I/O	TTL/ST ⁽²⁾	
RB7/PGD	40	44	17	I/O	TTL/ST ⁽²⁾	

Legend: I = input O = output I/O = input/output P = power
 — = Not used TTL = TTL input ST = Schmitt Trigger input

- Note 1: This buffer is a Schmitt Trigger input when configured as an external interrupt.
 2: This buffer is a Schmitt Trigger input when used in serial programming mode.
 3: This buffer is a Schmitt Trigger input when configured as general purpose I/O and a TTL input when used in the Parallel Slave Port mode (for interfacing to a microprocessor bus).
 4: This buffer is a Schmitt Trigger input when configured in RC oscillator mode and a CMOS input otherwise.

PIC16F87X

FIGURE 2-3: PIC16F877/876 REGISTER FILE MAP

								File Address
Indirect addr. ^(*)		Indirect addr. ^(*)		Indirect addr. ^(*)		Indirect addr. ^(*)		
TMR0	00h	OPTION_REG	80h	TMR0	100h	OPTION_REG	180h	
PCL	01h	PCL	81h	PCL	101h	PCL	181h	
STATUS	02h	STATUS	82h	STATUS	102h	STATUS	182h	
FSR	03h	FSR	83h	FSR	103h	FSR	183h	
PORTA	04h	TRISA	84h		104h		184h	
PORTB	05h	TRISB	85h	PORTB	105h	TRISB	185h	
PORTC	06h	TRISC	86h		106h		186h	
PORTD ^(*)	07h	TRISD ^(*)	87h		107h		187h	
PORTE ^(*)	08h	TRISE ^(*)	88h		108h		188h	
PCLATH	09h	PCLATH	89h		109h		189h	
INTCON	0Ah	INTCON	8Ah	PCLATH	10Ah	PCLATH	18Ah	
PIR1	0Bh	PIE1	8Bh	INTCON	10Bh	INTCON	18Bh	
PIR2	0Ch	PIE2	8Ch	EEDATA	10Ch	EECON1	18Ch	
TMR1L	0Dh	PCON	8Dh	EEADR	10Dh	EECON2	18Dh	
TMR1H	0Eh		8Eh	EEDATH	10Eh	Reserved ⁽²⁾	18Eh	
T1CON	0Fh		8Fh	EEADRH	10Fh	Reserved ⁽²⁾	18Fh	
T2CON	10h		90h	General Purpose Register 16 Bytes	110h	General Purpose Register 16 Bytes	190h	
SSPBUF	11h	SSPCON2	91h		111h		191h	
SSPCON	12h	PR2	92h		112h		192h	
CCPR1L	13h	SSPADD	93h		113h		193h	
CCPR1H	14h	SSPSTAT	94h		114h		194h	
CCP1CON	15h		95h		115h		195h	
RCSTA	16h		96h		116h		196h	
TXREG	17h		97h		117h		197h	
RCREG	18h	TXSTA	98h		118h		198h	
CCPR2L	19h	SPBRG	99h		119h		199h	
CCPR2H	1Ah		9Ah		11Ah		19Ah	
CCP2CON	1Bh		9Bh		11Bh		19Bh	
ADRESH	1Ch		9Ch		11Ch		19Ch	
ADCON0	1Dh		9Dh		11Dh		19Dh	
	1Eh	ADRESL	9Eh		11Eh		19Eh	
	1Fh	ADCON1	9Fh		11Fh		19Fh	
General Purpose Register 96 Bytes	20h		A0h	General Purpose Register 80 Bytes	120h	General Purpose Register 80 Bytes	1A0h	
		General Purpose Register 80 Bytes						
		accesses 70h-7Fh	EFh	accesses 70h-7Fh	16Fh	accesses 70h - 7Fh	1EFh	
			F0h		170h		1F0h	
			FFh		17Fh		1FFh	
Bank 0	7Fh	Bank 1	FFh	Bank 2	17Fh	Bank 3	1FFh	

■ Unimplemented data memory locations, read as '0'.
 * Not a physical register.
 Note 1: These registers are not implemented on 28-pin devices.
 2: These registers are reserved, maintain these registers clear.

PIC16F87X

TABLE 2-1: SPECIAL FUNCTION REGISTER SUMMARY

Address	Name	Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0	Value on: POR, BOR	Value on all other reset (2)
Bank 0											
00h ⁽⁴⁾	INDF	Addressing this location uses contents of FSR to address data memory (not a physical register)								0000 0000	0000 0000
01h	TMR0	Timer0 module's register								xxxx xxxx	uuuu uuuu
02h ⁽⁴⁾	PCL	Program Counter's (PC) Least Significant Byte								0000 0000	0000 0000
03h ⁽⁴⁾	STATUS	IRP	RP1	RP0	T0	PD	Z	DC	C	0001 1xxx	000q quuu
04h ⁽⁴⁾	FSR	Indirect data memory address pointer								xxxx xxxx	uuuu uuuu
05h	PORTA	—	—	PORTA Data Latch when written; PORTA pins when read						--0x 0000	--0u 0000
06h	PORTB	PORTB Data Latch when written; PORTB pins when read								xxxx xxxx	uuuu uuuu
07h	PORTC	PORTC Data Latch when written; PORTC pins when read								xxxx xxxx	uuuu uuuu
08h ⁽⁵⁾	PORTD	PORTD Data Latch when written; PORTD pins when read								xxxx xxxx	uuuu uuuu
09h ⁽⁵⁾	PORTE	—	—	—	—	—	RE2	RE1	RE0	---- -xxx	---- -uuu
0Ah ^(1,4)	PCLATH	—	—	—	Write Buffer for the upper 5 bits of the Program Counter					--0 0000	--0 0000
0Bh ⁽⁴⁾	INTCON	GIE	PEIE	TOIE	INTE	RBIE	TOIF	INTF	RBIF	0000 000x	0000 000u
0Ch	PIR1	PSPIF ⁽³⁾	ADIF	RCIF	TXIF	SSPIF	CCP1IF	TMR2IF	TMR1IF	0000 0000	0000 0000
0Dh	PIR2	—	(6)	—	EEIF	BCLIF	—	—	CCP2IF	-r-0 0--0	-r-0 0--0
0Eh	TMR1L	Holding register for the Least Significant Byte of the 16-bit TMR1 register								xxxx xxxx	uuuu uuuu
0Fh	TMR1H	Holding register for the Most Significant Byte of the 16-bit TMR1 register								xxxx xxxx	uuuu uuuu
10h	T1CON	—	—	T1CKPS1	T1CKPS0	T1OSCEN	T1SYNC	TMR1CS	TMR1ON	--00 0000	--uu 0000
11h	TMR2	Timer2 module's register								0000 0000	0000 0000
12h	T2CON	—	TOUTPS3	TOUTPS2	TOUTPS1	TOUTPS0	TMR2ON	T2CKPS1	T2CKPS0	-000 0000	-000 0000
13h	SSPBUF	Synchronous Serial Port Receive Buffer/Transmit Register								xxxx xxxx	uuuu uuuu
14h	SSPCON	WCOL	SSPOV	SSPEN	CKP	SSPM3	SSPM2	SSPM1	SSPM0	0000 0000	0000 0000
15h	CCPR1L	Capture/Compare/PWM Register1 (LSB)								xxxx xxxx	uuuu uuuu
16h	CCPR1H	Capture/Compare/PWM Register1 (MSB)								xxxx xxxx	uuuu uuuu
17h	CCP1CON	—	—	CCP1X	CCP1Y	CCP1M3	CCP1M2	CCP1M1	CCP1M0	--00 0000	--00 0000
18h	RСТА	SPEN	RX9	SREN	CREN	ADDEN	FERR	OERR	RX9D	0000 000x	0000 000x
19h	TXREG	USART Transmit Data Register								0000 0000	0000 0000
1Ah	RCREG	USART Receive Data Register								0000 0000	0000 0000
1Bh	CCPR2L	Capture/Compare/PWM Register2 (LSB)								xxxx xxxx	uuuu uuuu
1Ch	CCPR2H	Capture/Compare/PWM Register2 (MSB)								xxxx xxxx	uuuu uuuu
1Dh	CCP2CON	—	—	CCP2X	CCP2Y	CCP2M3	CCP2M2	CCP2M1	CCP2M0	--00 0000	--00 0000
1Eh	ADRESH	A/D Result Register High Byte								xxxx xxxx	uuuu uuuu
1Fh	ADCON0	ADCS1	ADCS0	CHS2	CHS1	CHS0	GO/DONE	—	ADON	0000 00-0	0000 00-0

Legend: x = unknown, u = unchanged, q = value depends on condition, - = unimplemented read as '0', r = reserved.

Shaded locations are unimplemented, read as '0'.

Note 1: The upper byte of the program counter is not directly accessible. PCLATH is a holding register for the PC<12:8> whose

contents are transferred to the upper byte of the program counter.

2: Other (non power-up) resets include external reset through MCLR and Watchdog Timer Reset.

3: Bits PSPIE and PSPIF are reserved on the 28-pin devices, always maintain these bits clear.

4: These registers can be addressed from any bank.

5: PORTD, PORTE, TRISD, and TRISE are not physically implemented on the 28-pin devices, read as '0'.

6: PIR2<6> and PIE2<6> are reserved on these devices, always maintain these bits clear.

PIC16F87X

TABLE 2-1: SPECIAL FUNCTION REGISTER SUMMARY (Cont'd)

Address	Name	Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0	Value on: POR, BOR	Value on all other resets (2)
Bank 1											
80h ⁽⁴⁾	INDF	Addressing this location uses contents of FSR to address data memory (not a physical register)								0000 0000	0000 0000
81h	OPTION_REG	RBPV	INTEDG	T0CS	T0SE	PSA	PS2	PS1	PS0	1111 1111	1111 1111
82h ⁽⁴⁾	PCL	Program Counter's (PC) Least Significant Byte								0000 0000	0000 0000
83h ⁽⁴⁾	STATUS	IRP	RP1	RP0	T0	PD	Z	DC	C	0001 1xxx	000q quuu
84h ⁽⁴⁾	FSR	Indirect data memory address pointer								xxxx xxxx	uuuu uuuu
85h	TRISA	—	—	PORTA Data Direction Register						--11 1111	--11 1111
86h	TRISB	PORTB Data Direction Register								1111 1111	1111 1111
87h	TRISC	PORTC Data Direction Register								1111 1111	1111 1111
88h ⁽⁵⁾	TRISD	PORTD Data Direction Register								1111 1111	1111 1111
89h ⁽⁵⁾	TRISE	IBF	CBF	IBOV	PSPMODE	—	PORTE Data Direction Bits			0000 -111	0000 -111
8Ah ^(1,4)	PCLATH	—	—	—	Write Buffer for the upper 5 bits of the Program Counter					---0 0000	---0 0000
8Bh ⁽⁴⁾	INTCON	GIE	PEIE	T0IE	INTE	RBIE	TOIF	INTF	RBIF	0000 000x	0000 000u
8Ch	PIE1	PSPIE ⁽³⁾	ADIE	RCIE	TXIE	SSPIE	CCP1IE	TMR2IE	TMR1IE	0000 0000	0000 0000
8Dh	PIE2	—	(6)	—	EEIE	BCLIE	—	—	CCP2IE	-r-0 0--0	-r-0 0--0
8Eh	PCON	—	—	—	—	—	—	POR	BOR	---- -b--	---- -uu-
8Fh	—	Unimplemented								—	—
90h	—	Unimplemented								—	—
91h	SSPCON2	GCEN	ACKSTAT	ACKDT	ACKEN	RCEN	PEN	RSEN	SEN	0000 0000	0000 0000
92h	PR2	Timer2 Period Register								1111 1111	1111 1111
93h	SSPADD	Synchronous Serial Port (I ² C mode) Address Register								0000 0000	0000 0000
94h	SSPSTAT	SMP	CKE	D/A	P	S	R/W	UA	BF	0000 0000	0000 0000
95h	—	Unimplemented								—	—
96h	—	Unimplemented								—	—
97h	—	Unimplemented								—	—
98h	TXSTA	CSRC	TX9	TXEN	SYNC	—	BRGH	TRMT	TX9D	0000 -010	0000 -010
99h	SPBRG	Baud Rate Generator Register								0000 0000	0000 0000
9Ah	—	Unimplemented								—	—
9Bh	—	Unimplemented								—	—
9Ch	—	Unimplemented								—	—
9Dh	—	Unimplemented								—	—
9Eh	ADRESL	A/D Result Register Low Byte								xxxx xxxx	uuuu uuuu
9Fh	ADCON1	ADFM	—	—	—	PCFG3	PCFG2	PCFG1	PCFG0	--0- 0000	--0- 0000

Legend: x = unknown, u = unchanged, q = value depends on condition, - = unimplemented read as '0', r = reserved.
Shaded locations are unimplemented, read as '0'.

Note 1: The upper byte of the program counter is not directly accessible. PCLATH is a holding register for the PC<12:8> whose

contents are transferred to the upper byte of the program counter.

2: Other (non power-up) resets include external reset through MCLR and Watchdog Timer Reset.

3: Bits PSPIE and PSPIF are reserved on the 28-pin devices, always maintain these bits clear.

4: These registers can be addressed from any bank.

5: PORTD, PORTE, TRISD, and TRISE are not physically implemented on the 28-pin devices, read as '0'.

6: PIR2<6> and PIE2<6> are reserved on these devices, always maintain these bits clear.

PIC16F87X

TABLE 2-1: SPECIAL FUNCTION REGISTER SUMMARY (Cont'd)

Address	Name	Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0	Value on: POR, BOR	Value on all other resets (2)
Bank 2											
100h ⁽⁴⁾	INDF	Addressing this location uses contents of FSR to address data memory (not a physical register)								0000 0000	0000 0000
101h	TMR0	Timer0 module's register								xxxx xxxx	uuuu uuuu
102h ⁽⁴⁾	PCL	Program Counter's (PC) Least Significant Byte								0000 0000	0000 0000
103h ⁽⁴⁾	STATUS	IRP	RP1	RP0	\overline{TO}	\overline{PD}	Z	DC	C	0001 1xxxx	000q quuuu
104h ⁽⁴⁾	FSR	Indirect data memory address pointer								xxxx xxxx	uuuu uuuu
105h	—	Unimplemented								—	—
106h	PORTB	PORTB Data Latch when written; PORTB pins when read								xxxx xxxx	uuuu uuuu
107h	—	Unimplemented								—	—
108h	—	Unimplemented								—	—
109h	—	Unimplemented								—	—
10Ah ^(1,4)	PCLATH	—	—	—	Write Buffer for the upper 5 bits of the Program Counter					---0 0000	---0 0000
10Bh ⁽⁴⁾	INTCON	GIE	PEIE	TOIE	INTE	RBIE	TOIF	INTF	RBIF	0000 000x	0000 000u
10Ch	EEDATA	EEPROM data register								xxxx xxxx	uuuu uuuu
10Dh	EEADR	EEPROM address register								xxxx xxxx	uuuu uuuu
10Eh	EEDATH	—	—	EEPROM data register high byte					xxxx xxxx	uuuu uuuu	
10Fh	EEADRH	—	—	—	EEPROM address register high byte					xxxx xxxx	uuuu uuuu
Bank 3											
180h ⁽⁴⁾	INDF	Addressing this location uses contents of FSR to address data memory (not a physical register)								0000 0000	0000 0000
181h	OPTION_REG	RBP0	INTEDG	T0CS	T0SE	PSA	PS2	PS1	PS0	1111 1111	1111 1111
182h ⁽⁴⁾	PCL	Program Counter's (PC) Least Significant Byte								0000 0000	0000 0000
183h ⁽⁴⁾	STATUS	IRP	RP1	RP0	\overline{TO}	\overline{PD}	Z	DC	C	0001 1xxxx	000q quuuu
184h ⁽⁴⁾	FSR	Indirect data memory address pointer								xxxx xxxx	uuuu uuuu
185h	—	Unimplemented								—	—
186h	TRISB	PORTB Data Direction Register								1111 1111	1111 1111
187h	—	Unimplemented								—	—
188h	—	Unimplemented								—	—
189h	—	Unimplemented								—	—
18Ah ^(1,4)	PCLATH	—	—	—	Write Buffer for the upper 5 bits of the Program Counter					---0 0000	---0 0000
18Bh ⁽⁴⁾	INTCON	GIE	PEIE	TOIE	INTE	RBIE	TOIF	INTF	RBIF	0000 000x	0000 000u
18Ch	EECON1	EEPGD	—	—	—	WRERR	WREN	WR	RD	x--- x000	x--- u000
18Dh	EECON2	EEPROM control register2 (not a physical register)								---- ----	---- ----
18Eh	—	Reserved maintain clear								0000 0000	0000 0000
18Fh	—	Reserved maintain clear								0000 0000	0000 0000

Legend: x = unknown, u = unchanged, q = value depends on condition, - = unimplemented read as '0', r = reserved.
Shaded locations are unimplemented, read as '0'.

- Note 1: The upper byte of the program counter is not directly accessible. PCLATH is a holding register for the PC<12:8> whose contents are transferred to the upper byte of the program counter.
- 2: Other (non power-up) resets include external reset through MCLR and Watchdog Timer Reset.
- 3: Bits PSPIE and PSPIF are reserved on the 28-pin devices, always maintain these bits clear.
- 4: These registers can be addressed from any bank.
- 5: PORTD, PORTE, TRISD, and TRISE are not physically implemented on the 28-pin devices, read as '0'.
- 6: PIR2<6> and PIE2<6> are reserved on these devices, always maintain these bits clear.

PIC16F87X

2.2.2.1 STATUS REGISTER

The STATUS register, shown in Figure 2-5, contains the arithmetic status of the ALU, the RESET status and the bank select bits for data memory.

The STATUS register can be the destination for any instruction, as with any other register. If the STATUS register is the destination for an instruction that affects the Z, DC or C bits, then the write to these three bits is disabled. These bits are set or cleared according to the device logic. Furthermore, the \overline{TO} and \overline{PD} bits are not writable. Therefore, the result of an instruction with the STATUS register as destination may be different than intended.

For example, CLRF STATUS will clear the upper-three bits and set the Z bit. This leaves the STATUS register as $000u\ u1uu$ (where u = unchanged).

It is recommended, therefore, that only BCF , BSF , SWAPF and MOVWF instructions are used to alter the STATUS register because these instructions do not affect the Z, C or DC bits from the STATUS register. For other instructions, not affecting any status bits, see the "Instruction Set Summary."

Note 1: The C and DC bits operate as a borrow and digit borrow bit, respectively, in subtraction. See the SUBLW and SUBWF instructions for examples.

FIGURE 2-5: STATUS REGISTER (ADDRESS 03h, 83h, 103h, 183h)

R/W-0	R/W-0	R/W-0	R-1	R-1	R/W-x	R/W-x	R/W-x
IRP	RP1	RP0	\overline{TO}	\overline{PD}	Z	DC	C
bit7							bit0

R = Readable bit
W = Writable bit
U = Unimplemented bit, read as '0'
- n = Value at POR reset

bit 7: **IRP:** Register Bank Select bit (used for indirect addressing)
1 = Bank 2, 3 (100h - 1FFh)
0 = Bank 0, 1 (00h - FFh)

bit 6-5: **RP1:RP0:** Register Bank Select bits (used for direct addressing)
11 = Bank 3 (180h - 1FFh)
10 = Bank 2 (100h - 17Fh)
01 = Bank 1 (80h - FFh)
00 = Bank 0 (00h - 7Fh)
Each bank is 128 bytes

bit 4: **\overline{TO} :** Time-out bit
1 = After power-up, CLRWDT instruction, or SLEEP instruction
0 = A WDT time-out occurred

bit 3: **\overline{PD} :** Power-down bit
1 = After power-up or by the CLRWDT instruction
0 = By execution of the SLEEP instruction

bit 2: **Z:** Zero bit
1 = The result of an arithmetic or logic operation is zero
0 = The result of an arithmetic or logic operation is not zero

bit 1: **DC:** Digit carry/borrow bit (ADDWF , ADDLW , SUBLW , SUBWF instructions) (for borrow the polarity is reversed)
1 = A carry-out from the 4th low order bit of the result occurred
0 = No carry-out from the 4th low order bit of the result

bit 0: **C:** Carry/borrow bit (ADDWF , ADDLW , SUBLW , SUBWF instructions)
1 = A carry-out from the most significant bit of the result occurred
0 = No carry-out from the most significant bit of the result occurred
Note: For borrow the polarity is reversed. A subtraction is executed by adding the two's complement of the second operand. For rotate (RRF , RLF) instructions, this bit is loaded with either the high or low order bit of the source register.

9.1.4 MASTER MODE

The master can initiate the data transfer at any time because it controls the SCK. The master determines when the slave (Processor 2, [Figure 9-5](#)) is to broadcast data by the software protocol.

In master mode the data is transmitted/received as soon as the SSPBUF register is written to. If the SPI module is only going to receive, the SDO output could be disabled (programmed as an input). The SSPSR register will continue to shift in the signal present on the SDI pin at the programmed clock rate. As each byte is received, it will be loaded into the SSPBUF register as if a normal received byte (interrupts and status bits appropriately set). This could be useful in receiver applications as a "line activity monitor".

The clock polarity is selected by appropriately programming bit CKP (SSPCON<4>). This then would give waveforms for SPI communication as shown in

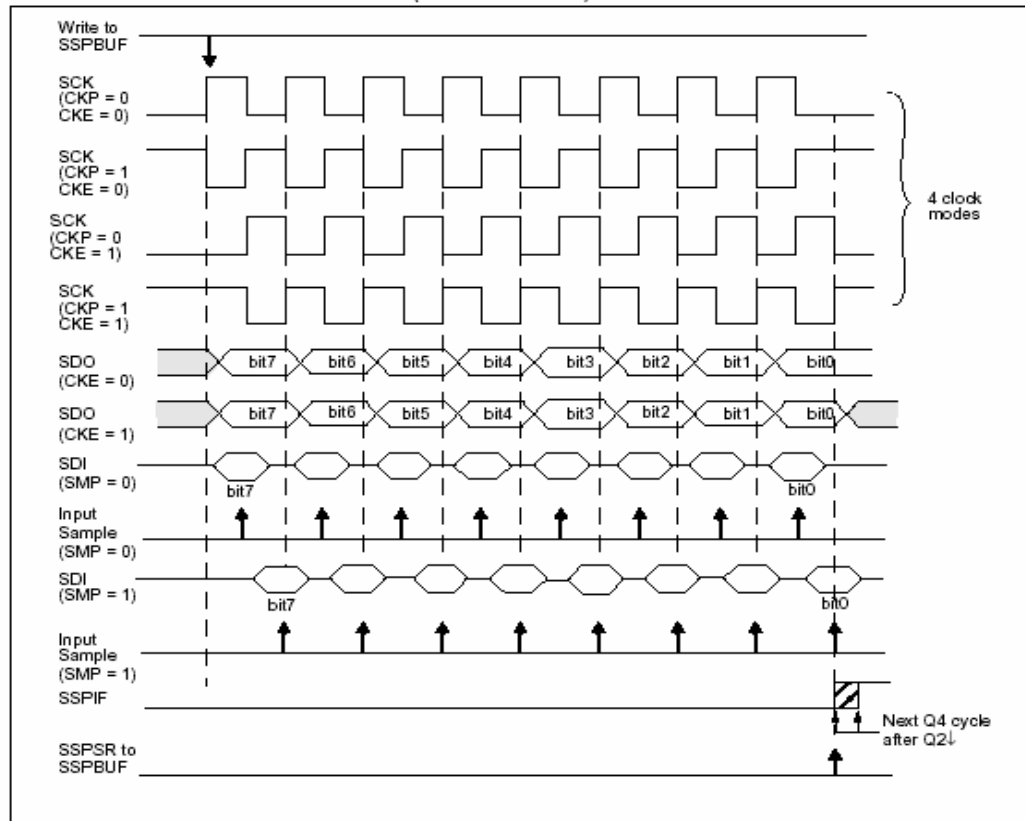
[Figure 9-6](#), [Figure 9-8](#), and [Figure 9-9](#) where the MSb is transmitted first. In master mode, the SPI clock rate (bit rate) is user programmable to be one of the following:

- $F_{OSC}/4$ (or T_{CY})
- $F_{OSC}/16$ (or $4 \cdot T_{CY}$)
- $F_{OSC}/64$ (or $16 \cdot T_{CY}$)
- $\text{Timer2 output}/2$

This allows a maximum bit clock frequency (at 20 MHz) of 5.0 MHz.

[Figure 9-6](#) shows the waveforms for Master mode. When $\text{CKE} = 1$, the SDO data is valid before there is a clock edge on SCK. The change of the input sample is shown based on the state of the SMP bit. The time when the SSPBUF is loaded with the received data is shown.

FIGURE 9-6: SPI MODE WAVEFORM (MASTER MODE)



9.2 MSSP I²C Operation

The MSSP module in I²C mode fully implements all master and slave functions (including general call support) and provides interrupts on start and stop bits in hardware to determine a free bus (multi-master function). The MSSP module implements the standard mode specifications as well as 7-bit and 10-bit addressing.

Refer to Application Note AN578, "Use of the SSP Module in the I²C Multi-Master Environment."

A "glitch" filter is on the SCL and SDA pins when the pin is an input. This filter operates in both the 100 kHz and 400 kHz modes. In the 100 kHz mode, when these pins are an output, there is a slew rate control of the pin that is independent of device frequency.

FIGURE 9-10: I²C SLAVE MODE BLOCK DIAGRAM

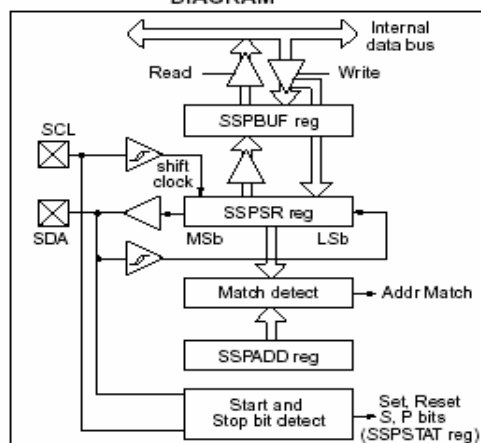
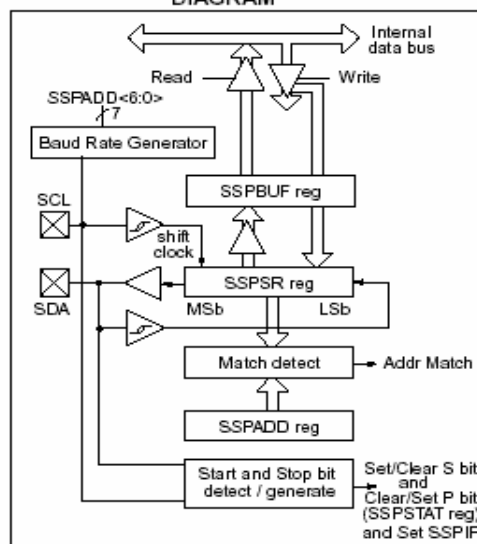


FIGURE 9-11: I²C MASTER MODE BLOCK DIAGRAM



Two pins are used for data transfer. These are the SCL pin, which is the clock, and the SDA pin, which is the data. The SDA and SCL pins that are automatically configured when the I²C mode is enabled. The SSP module functions are enabled by setting SSP Enable bit SSPEN (SSPCON<5>).

The MSSP module has six registers for I²C operation. They are the:

- SSP Control Register (SSPCON)
- SSP Control Register2 (SSPCON2)
- SSP Status Register (SSPSTAT)
- Serial Receive/Transmit Buffer (SSPBUF)
- SSP Shift Register (SSPSR) - Not directly accessible
- SSP Address Register (SSPADD)

The SSPCON register allows control of the I²C operation. Four mode selection bits (SSPCON<3:0>) allow one of the following I²C modes to be selected:

- I²C Slave mode (7-bit address)
- I²C Slave mode (10-bit address)
- I²C Master mode, clock = OSC/4 (SSPADD +1)

Before selecting any I²C mode, the SCL and SDA pins must be programmed to inputs by setting the appropriate TRIS bits. Selecting an I²C mode, by setting the SSPEN bit, enables the SCL and SDA pins to be used as the clock and data lines in I²C mode.

The CKE bit (SSPSTAT<67>) sets the levels of the SDA and SCL pins in either master or slave mode. When CKE = 1, the levels will conform to the SMBUS specification. When CKE = 0, the levels will conform to the I²C specification.

PIC16F87X

The SSPSTAT register gives the status of the data transfer. This information includes detection of a START (S) or STOP (P) bit, specifies if the received byte was data or address if the next byte is the completion of 10-bit address, and if this will be a read or write data transfer.

SSPBUF is the register to which the transfer data is written to or read from. The SSPSR register shifts the data in or out of the device. In receive operations, the SSPBUF and SSPSR create a doubled buffered receiver. This allows reception of the next byte to begin before reading the last byte of received data. When the complete byte is received, it is transferred to the SSPBUF register and flag bit SSPIF is set. If another complete byte is received before the SSPBUF register is read, a receiver overflow has occurred and bit SSPOV (SSPCON<6>) is set and the byte in the SSPSR is lost.

The SSPADD register holds the slave address. In 10-bit mode, the user needs to write the high byte of the address (1111 0 A9 A8 0). Following the high byte address match, the low byte of the address needs to be loaded (A7:A0).

9.2.1 SLAVE MODE

In slave mode, the SCL and SDA pins must be configured as inputs. The MSSP module will override the input state with the output data when required (slave-transmitter).

When an address is matched or the data transfer after an address match is received, the hardware automatically will generate the acknowledge (ACK) pulse, and then load the SSPBUF register with the received value currently in the SSPSR register.

There are certain conditions that will cause the MSSP module not to give this ACK pulse. These are if either (or both):

- The buffer full bit BF (SSPSTAT<0>) was set before the transfer was received.
- The overflow bit SSPOV (SSPCON<6>) was set before the transfer was received.

If the BF bit is set, the SSPSR register value is not loaded into the SSPBUF, but bit SSPIF and SSPOV are set. Table 9-2 shows what happens when a data transfer byte is received, given the status of bits BF and SSPOV. The shaded cells show the condition where user software did not properly clear the overflow condition. Flag bit BF is cleared by reading the SSPBUF register while bit SSPOV is cleared through software.

The SCL clock input must have a minimum high and low time for proper operation. The high and low times of the I²C specification as well as the requirement of the MSSP module is shown in timing parameter #100 and parameter #101 of the Electrical Specifications.

9.2.1.1 ADDRESSING

Once the MSSP module has been enabled, it waits for a START condition to occur. Following the START condition, the 8-bits are shifted into the SSPSR register. All incoming bits are sampled with the rising edge of the clock (SCL) line. The value of register SSPSR<7:1> is compared to the value of the SSPADD register. The address is compared on the falling edge of the eighth clock (SCL) pulse. If the addresses match, and the BF and SSPOV bits are clear, the following events occur:

- The SSPSR register value is loaded into the SSPBUF register on the falling edge of the 8th SCL pulse.
- The buffer full bit, BF is set on the falling edge of the 8th SCL pulse.
- An ACK pulse is generated.
- SSP interrupt flag bit, SSPIF (PIR1<3>) is set (interrupt is generated if enabled) - on the falling edge of the 9th SCL pulse.

In 10-bit address mode, two address bytes need to be received by the slave. The five Most Significant bits (MSBs) of the first address byte specify if this is a 10-bit address. Bit R/W (SSPSTAT<2>) must specify a write so the slave device will receive the second address byte. For a 10-bit address the first byte would equal '1111 0 A9 A8 0', where A9 and A8 are the two MSBs of the address. The sequence of events for a 10-bit address is as follows, with steps 7-9 for slave-transmitter:

- Receive first (high) byte of Address (bits SSPIF, BF, and bit UA (SSPSTAT<1>) are set).
- Update the SSPADD register with second (low) byte of Address (clears bit UA and releases the SCL line).
- Read the SSPBUF register (clears bit BF) and clear flag bit SSPIF.
- Receive second (low) byte of Address (bits SSPIF, BF, and UA are set).
- Update the SSPADD register with the first (high) byte of Address. This will clear bit UA and release the SCL line.
- Read the SSPBUF register (clears bit BF) and clear flag bit SSPIF.
- Receive Repeated Start condition.
- Receive first (high) byte of Address (bits SSPIF and BF are set).
- Read the SSPBUF register (clears bit BF) and clear flag bit SSPIF.

Note: Following the Repeated Start condition (step 7) in 10-bit mode, the user only needs to match the first 7-bit address. The user does not update the SSPADD for the second half of the address.

PIC16F87X

9.2.1.2 SLAVE RECEPTION

When the R/W bit of the address byte is clear and an address match occurs, the R/W bit of the SSPSTAT register is cleared. The received address is loaded into the SSPBUF register.

When the address byte overflow condition exists, then no acknowledge (ACK) pulse is given. An overflow condition is defined as either bit BF (SSPSTAT<0>) is set or bit SSPOV (SSPCON<6>) is set.

An SSP interrupt is generated for each data transfer byte. Flag bit SSPIF (PIR1<3>) must be cleared in software. The SSPSTAT register is used to determine the status of the received byte.

Note: The SSPBUF will be loaded if the SSPOV bit is set and the BF flag is cleared. If a read of the SSPBUF was performed, but the user did not clear the state of the SSPOV bit before the next receive occurred. The ACK is not sent and the SSPBUF is updated.

TABLE 9-2 DATA TRANSFER RECEIVED BYTE ACTIONS

Status Bits as Data Transfer is Received		SSPSR → SSPBUF	Generate ACK Pulse	Set bit SSPIF (SSP Interrupt occurs if enabled)
BF	SSPOV			
0	0	Yes	Yes	Yes
1	0	No	No	Yes
1	1	No	No	Yes
0	1	Yes	No	Yes

Note 1: Shaded cells show the conditions where the user software did not properly clear the overflow condition.

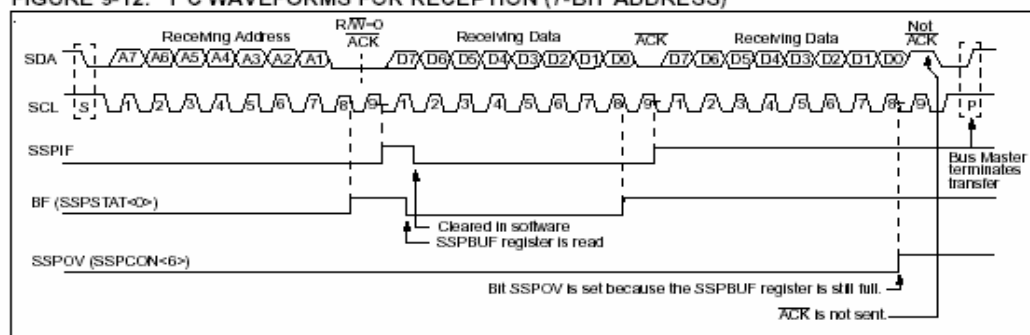
9.2.1.3 SLAVE TRANSMISSION

When the R/W bit of the incoming address byte is set and an address match occurs, the R/W bit of the SSPSTAT register is set. The received address is loaded into the SSPBUF register. The ACK pulse will be sent on the ninth bit, and the SCL pin is held low. The transmit data must be loaded into the SSPBUF register, which also loads the SSPSR register. Then the SCL pin should be enabled by setting bit CKP (SSPCON<4>). The master must monitor the SCL pin prior to asserting another clock pulse. The slave devices may be holding off the master by stretching the clock. The eight data bits are shifted out on the falling edge of the SCL input. This ensures that the SDA signal is valid during the SCL high time (Figure 9-13).

An SSP interrupt is generated for each data transfer byte. The SSPIF flag bit must be cleared in software, and the SSPSTAT register is used to determine the status of the byte transfer. The SSPIF flag bit is set on the falling edge of the ninth clock pulse.

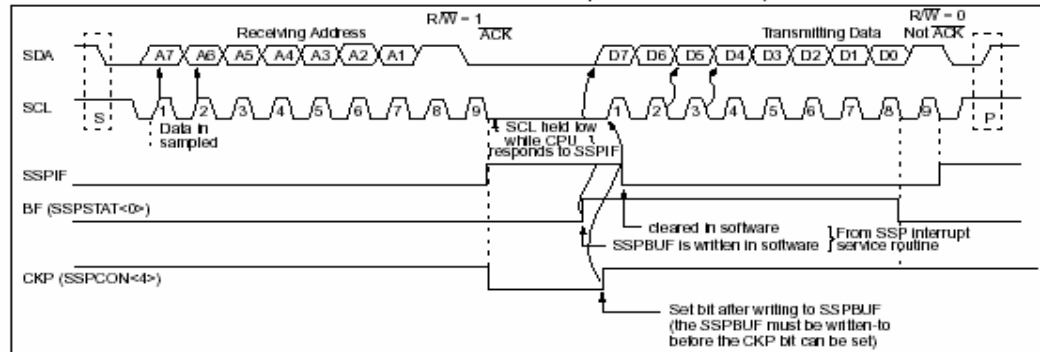
As a slave-transmitter, the ACK pulse from the master-receiver is latched on the rising edge of the ninth SCL input pulse. If the SDA line was high (not ACK), then the data transfer is complete. When the not ACK is latched by the slave, the slave logic is reset and the slave then monitors for another occurrence of the START bit. If the SDA line was low (ACK), the transmit data must be loaded into the SSPBUF register, which also loads the SSPSR register. Then the SCL pin should be enabled by setting the CKP bit.

FIGURE 9-12: I²C WAVEFORMS FOR RECEPTION (7-BIT ADDRESS)



PIC16F87X

FIGURE 9-13: I²C WAVEFORMS FOR TRANSMISSION (7-BIT ADDRESS)



9.2.18.15 BUS COLLISION DURING A START CONDITION

During a START condition, a bus collision occurs if:

- SDA or SCL are sampled low at the beginning of the START condition (Figure 9-35).
- SCL is sampled low before SDA is asserted low. (Figure 9-36).

During a START condition both the SDA and the SCL pins are monitored.

If:

the SDA pin is already low
or the SCL pin is already low,

then:

the START condition is aborted,
and the BCLIF flag is set,
and the SSP module is reset to its IDLE state
(Figure 9-35).

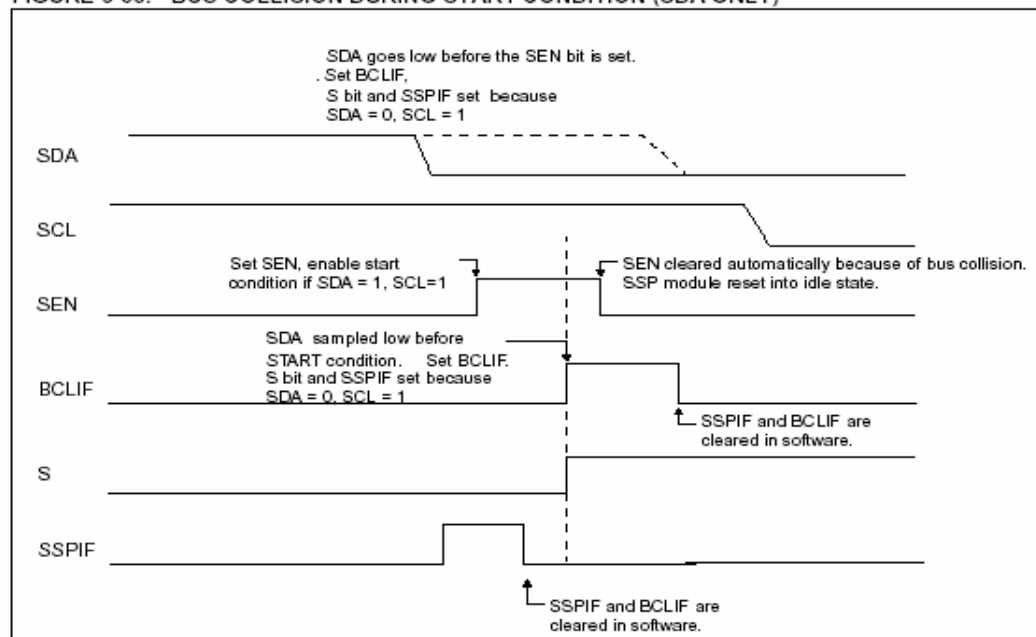
The START condition begins with the SDA and SCL pins de-asserted. When the SDA pin is sampled high, the baud rate generator is loaded from SSPADD<6:0> and counts down to 0. If the SCL pin is sampled low

while SDA is high, a bus collision occurs, because it is assumed that another master is attempting to drive a data '1' during the START condition.

If the SDA pin is sampled low during this count, the BRG is reset and the SDA line is asserted early (Figure 9-37). If however a '1' is sampled on the SDA pin, the SDA pin is asserted low at the end of the BRG count. The baud rate generator is then reloaded and counts down to 0, and during this time, if the SCL pins is sampled as '0', a bus collision does not occur. At the end of the BRG count the SCL pin is asserted low.

Note: The reason that bus collision is not a factor during a START condition is that no two bus masters can assert a START condition at the exact same time. Therefore, one master will always assert SDA before the other. This condition does not cause a bus collision because the two masters must be allowed to arbitrate the first address following the START condition, and if the address is the same, arbitration must be allowed to continue into the data portion, REPEATED START, or STOP conditions.

FIGURE 9-35: BUS COLLISION DURING START CONDITION (SDA ONLY)



PIC16F87X

FIGURE 9-36: BUS COLLISION DURING START CONDITION (SCL = 0)

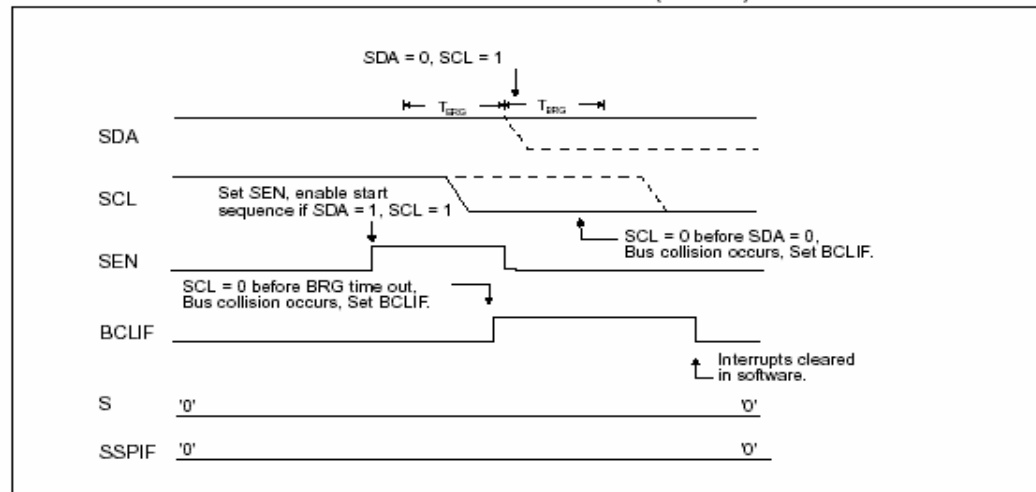
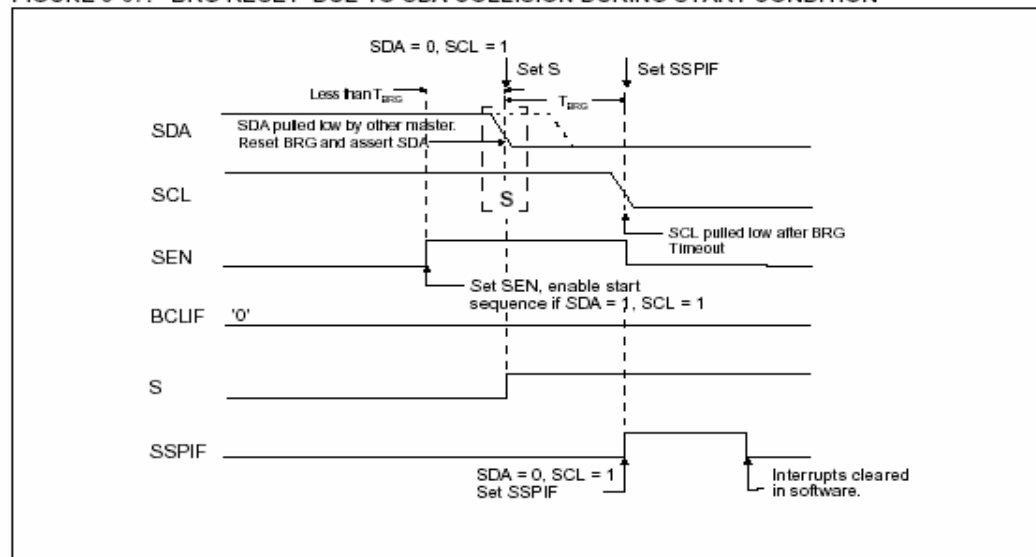


FIGURE 9-37: BRG RESET DUE TO SDA COLLISION DURING START CONDITION



9.2.18.16 BUS COLLISION DURING A REPEATED START CONDITION

During a Repeated Start condition, a bus collision occurs if:

- A low level is sampled on SDA when SCL goes from low level to high level.
- SCL goes low before SDA is asserted low, indicating that another master is attempting to transmit a data '1'.

When the user de-asserts SDA and the pin is allowed to float high, the BRG is loaded with SSPADD<6:0>, and counts down to 0. The SCL pin is then de-asserted, and when sampled high, the SDA pin is sampled. If SDA is low, a bus collision has occurred (i.e. another master is attempting to transmit a data '0'). If

however SDA is sampled high then the BRG is reloaded and begins counting. If SDA goes from high to low before the BRG times out, no bus collision occurs, because no two masters can assert SDA at exactly the same time.

If, however, SCL goes from high to low before the BRG times out and SDA has not already been asserted, then a bus collision occurs. In this case, another master is attempting to transmit a data '1' during the Repeated Start condition.

If at the end of the BRG time out both SCL and SDA are still high, the SDA pin is driven low, the BRG is reloaded, and begins counting. At the end of the count, regardless of the status of the SCL pin, the SCL pin is driven low and the Repeated Start condition is complete (Figure 9-38).

FIGURE 9-38: BUS COLLISION DURING A REPEATED START CONDITION (CASE 1)

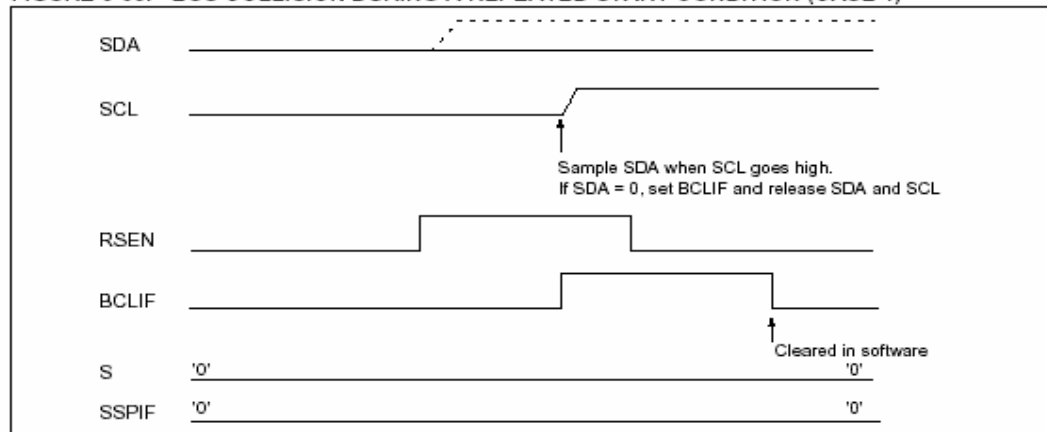
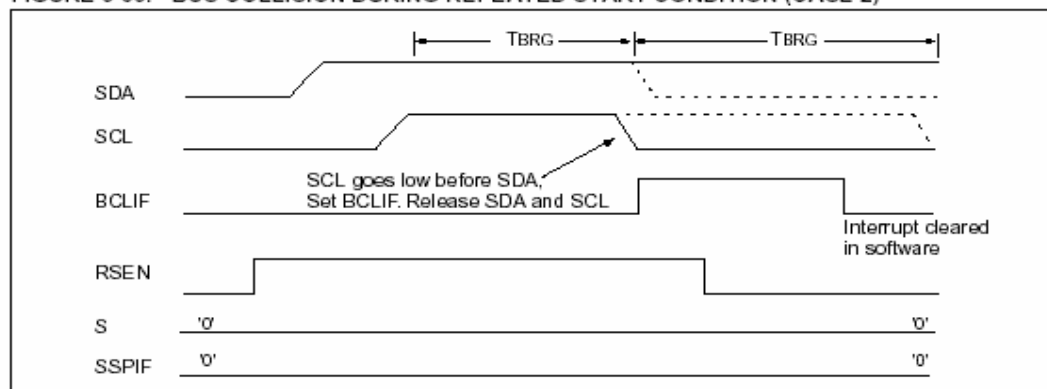


FIGURE 9-39: BUS COLLISION DURING REPEATED START CONDITION (CASE 2)



ANEXO F. DAC714P



DAC714

16-Bit DIGITAL-TO-ANALOG CONVERTER With Serial Data Interface

FEATURES:

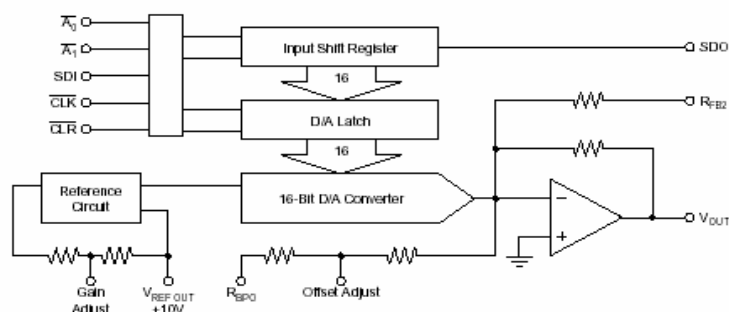
- SERIAL DIGITAL INTERFACE
- VOLTAGE OUTPUT: $\pm 10V$, $\pm 5V$, 0 to $+10V$
- ± 1 LSB INTEGRAL LINEARITY
- 16-BIT MONOTONIC OVER TEMPERATURE
- PRECISION INTERNAL REFERENCE
- LOW NOISE: $120nV/\sqrt{Hz}$ Including Reference
- 16-LEAD PLASTIC AND CERAMIC SKINNY DIP AND PLASTIC SOIC PACKAGES

DESCRIPTION

The DAC714 is a complete monolithic digital-to-analog converter including a $+10V$ temperature compensated reference, current-to-voltage amplifier, a high-speed synchronous serial interface, a serial output which allows cascading multiple converters, and an asynchronous clear function which immediately sets the output voltage to midscale.

The output voltage range is $\pm 10V$, $\pm 5V$, or 0 to $+10V$ while operating from $\pm 12V$ or $\pm 15V$ supplies. The gain and bipolar offset adjustments are designed so that they can be set via external potentiometers or external D/A converters. The output amplifier is protected against short circuit to ground.

The 16-pin DAC714 is available in a plastic 0.3" DIP, ceramic 0.3" Cerdip, and wide-body plastic SOIC package. The DAC714P, U, HB, and HC are specified over the $-40^{\circ}C$ to $+85^{\circ}C$ temperature range while the DAC714HL is specified over the $0^{\circ}C$ to $+70^{\circ}C$ range.

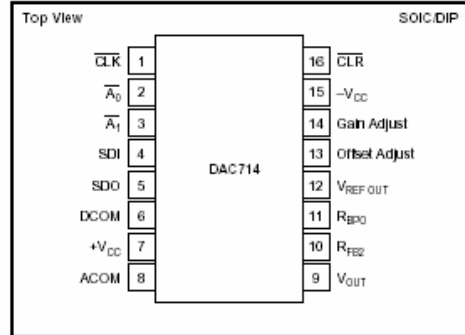


SPECIFICATIONS

At $T_A = +25^{\circ}\text{C}$, $+V_{CC} = +12\text{V}$ and $+15\text{V}$, $-V_{CC} = -12\text{V}$, and -15V , unless otherwise noted.

	DAC714P, U			DAC714HB			DAC714HC			DAC714HL			
PARAMETER	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	UNITS
TRANSFER CHARACTERISTICS													
ACCURACY													
Linearity Error			±4			±2			±1			±1	LSB
T_{MIN} to T_{MAX}			±5			±4			±2			±2	LSB
Differential Linearity Error			±4			±2			±1			±1	LSB
T_{MIN} to T_{MAX}			±5			±4			±2			±1	LSB
Monotonicity	14			15			16			16			Bits
Monotonicity Over Spec Temp Range	13			14			15			16			Bits
Gain Error ⁽¹⁾			±0.1			±0.1			±0.1			±0.1	%
T_{MIN} to T_{MAX}			±0.25			±0.25			±0.25			±0.25	%
Unipolar/Bipolar Zero Error ⁽¹⁾			±0.1			±0.1			±0.1			±0.1	% of FSR ⁽²⁾
T_{MIN} to T_{MAX}			±0.2			±0.2			±0.2			±0.2	% of FSR
Power Supply Sensitivity of Gain			±0.003			±0.003			±0.003			±0.003	%FSR/%V _{CC}
			±30			±30			±30			±30	ppm FSR/%V _{CC}
DYNAMIC PERFORMANCE													
Settling Time													
(to ±0.003%FSR, 5kΩ 500pF Load) ⁽⁴⁾		6	10		6	10		6	10		6	10	μs
20V Output Step		4			4			4			4		μs
1LSB Output Step ⁽⁵⁾		10			10			10			10		V _{LSB}
Output Slew Rate													V/μs
Total Harmonic Distortion													
0dB, 100kHz, I _S = 100kHz		0.005			0.005			0.005			0.005		%
-20dB, 100kHz, I _S = 100kHz		0.03			0.03			0.03			0.03		%
-60dB, 100kHz, I _S = 100kHz		3.0			3.0			3.0			3.0		%
SINAD: 100kHz, I _S = 100kHz		87			87			87			87		dB
Digital Feedthrough ⁽⁶⁾		2			2			2			2		nV-s
Digital-to-Analog Glitch Impulse ⁽⁶⁾		15			15			15			15		nV-s
Output Noise Voltage (includes reference)		120			120			120			120		nV/√Hz
ANALOG OUTPUT													
Output Voltage Range													
+V _{CC} , -V _{CC} = ±11.4V	±10			±10			±10			±10			V
Output Current	±5			±5			±5			±5			V
Output Impedance		0.1			0.1			0.1			0.1		Ω
Short Circuit to ACOM Duration		Indefinite			Indefinite			Indefinite			Indefinite		
REFERENCE VOLTAGE													
Voltage	+9.975	+10.000	+10.025	+9.975	+10.000	+10.025	+9.975	+10.000	+10.025	+9.975	+10.000	+10.025	V
T_{MIN} to T_{MAX}	+9.960		+10.040	+9.960		+10.040	+9.960		+10.040	+9.960		+10.040	V
Output Resistance		1			1			1			1		Ω
Source Current	2			2			2			2			mA
Short Circuit to ACOM Duration		Indefinite			Indefinite			Indefinite			Indefinite		
INTERFACE													
RESOLUTION													
DIGITAL INPUTS		16			16			16			16		Bits
Serial Data Input Code													
Logic Levels ⁽⁷⁾													
V _{IH}	+2.0		V _{CC} -1.4	+2.0		V _{CC} -1.4	+2.0		V _{CC} -1.4	+2.0		V _{CC} -1.4	V
V _{IL}	0		+0.8	0		+0.8	0		+0.8	0		+0.8	V
I _{IH} (V _I = +2.7V)			±10			±10			±10			±10	μA
I _{IL} (V _I = +0.4V)			±10			±10			±10			±10	μA
DIGITAL OUTPUT													
Serial Data													
V _{OL} (I _{SENK} = 1.6mA)	0		+0.4	0		+0.4	0		+0.4	0		+0.4	V
V _{OHL} (I _{SOURCE} = 500μA), T_{MIN} to T_{MAX}	+2.4		+5	+2.4		+5	+2.4		+5	+2.4		+5	V
POWER SUPPLY REQUIREMENTS													
Voltage													
+V _{CC}	+11.4	+15	+16.5	+11.4	+15	+16.5	+11.4	+15	+16.5	+11.4	+15	+16.5	V
-V _{CC}	-11.4	-15	-16.5	-11.4	-15	-16.5	-11.4	-15	-16.5	-11.4	-15	-16.5	V
Current (No Load, ±15V Supplies) ⁽⁸⁾													
+V _{CC}		13	16		13	16		13	16		13	16	mA
-V _{CC}		22	26		22	26		22	26		22	26	mA
Power Dissipation ⁽⁹⁾			625			625			625			625	mW
TEMPERATURE RANGES													
Specification													
All Grades	-40		+85	-40		+85	-40		+85	0		+70	°C
Storage	-60		+150	-60		+150	-60		+150	-60		+150	°C
Thermal Coefficient, θ _{JA}		75			75			75			75		°C/W

PIN CONFIGURATION



PIN DESCRIPTIONS

PIN	LABEL	DESCRIPTION
1	CLK	Serial Data Clock
2	$\overline{A_0}$	Enable for Input Register (Active Low)
3	$\overline{A_1}$	Enable for D/A Latch (Active Low)
4	SDI	Serial Data Input
5	SDO	Serial Data Output
6	DCOM	Digital Ground
7	+V _{CC}	Positive Power Supply
8	ACOM	Analog Ground
9	V _{OUT}	D/A Output
10	R _{FB2}	±10V Range Feedback Output
11	R _{BPO}	Bipolar Offset
12	V _{REF OUT}	Voltage Reference Output
13	Offset Adjust	Offset Adjust
14	Gain Adjust	Gain Adjust
15	-V _{CC}	Negative Power Supply
16	CLR	Clear



ELECTROSTATIC DISCHARGE SENSITIVITY

Electrostatic discharge can cause damage ranging from performance degradation to complete device failure. Burr-Brown Corporation recommends that all integrated circuits be handled and stored using appropriate ESD protection methods.

ESD damage can range from subtle performance degradation to complete device failure. Precision integrated circuits may be more susceptible to damage because very small parametric changes could cause the device not to meet published specifications.

ORDERING INFORMATION

PRODUCT	PACKAGE	LINEARITY ERROR max at +25°C	TEMPERATURE RANGE
DAC714P	Plastic DIP	±4 LSB	-40°C to +85°C
DAC714U	Plastic SOIC	±4 LSB	-40°C to +85°C
DAC714HB	Ceramic DIP	±2 LSB	-40°C to +85°C
DAC714HC	Ceramic DIP	±1 LSB	-40°C to +85°C
DAC714HL	Ceramic DIP	±1 LSB	0°C to +70°C

PACKAGE INFORMATION

PRODUCT	PACKAGE	PACKAGE DRAWING NUMBER(1)
DAC714P	Plastic DIP	180
DAC714U	Plastic SOIC	211
DAC714H	Ceramic DIP	129

NOTE: (1) For detailed drawing and dimension table, please see end of data sheet, or Appendix C of Burr-Brown IC Data Book.

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS⁽¹⁾

+V _{CC} to Common	0V to +17V
-V _{CC} to Common	0V to -17V
+V _{CC} to -V _{CC}	34V
ACOM to DCOM	±0.5V
Digital Inputs to Common	-1V to (V _{CC} - 0.7V)
External Voltage Applied to BPO and Range Resistors	±V _{CC}
V _{REF OUT}	Indefinite Short to Common
V _{OUT}	Indefinite Short to Common
SDO	Indefinite Short to Common
Power Dissipation	750mW
Storage Temperature	-60°C to +150°C
Lead Temperature (soldering, 10s)	+300°C

NOTE: (1) Stresses above those listed under "Absolute Maximum Ratings" may cause permanent damage to the device. Exposure to absolute maximum conditions for extended periods may affect device reliability.

TIMING SPECIFICATIONS

$T_A = -40^{\circ}\text{C}$ to $+85^{\circ}\text{C}$, $V_{CC} = +12\text{V}$ or $+15\text{V}$, $-V_{CC} = -12\text{V}$ or -15V .

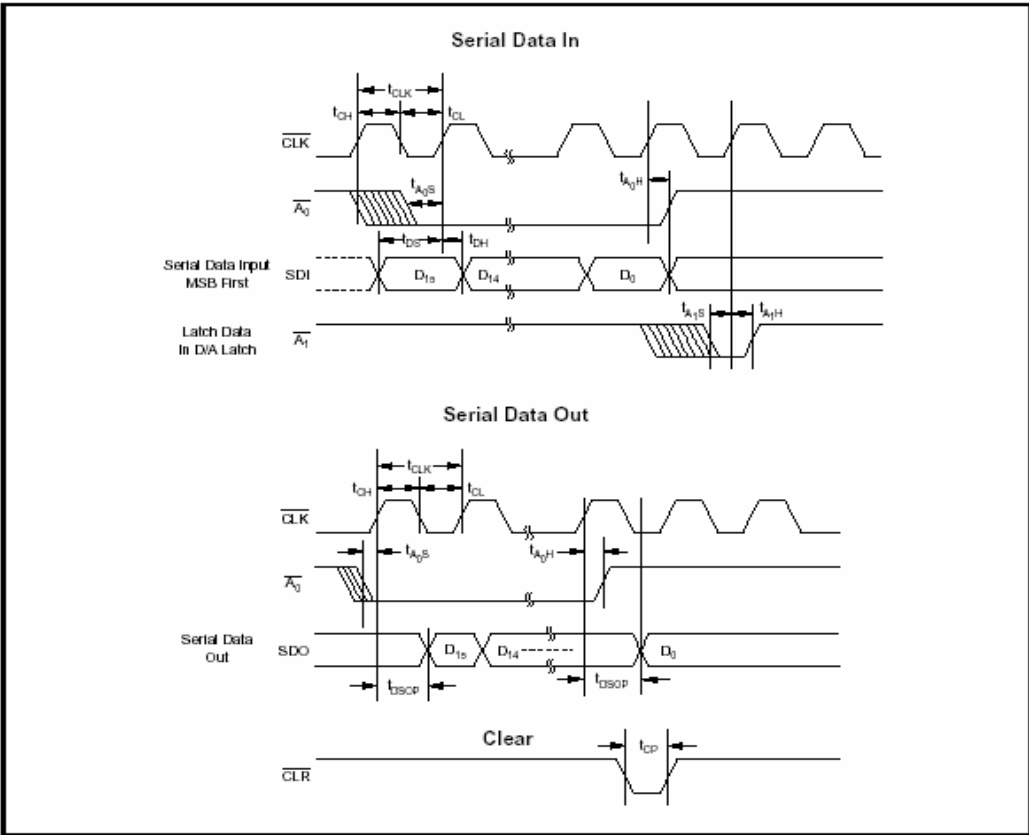
SYMBOL	PARAMETER	MIN	MAX	UNITS
t_{CLK}	Data Clock Period	100		ns
t_{CL}	Clock LOW	50		ns
t_{CH}	Clock HIGH	50		ns
t_{A0S}	Setup Time for $\overline{A_0}$	50		ns
t_{A0H}	Hold Time for $\overline{A_0}$	50		ns
t_{A1S}	Setup Time for $\overline{A_1}$	0		ns
t_{A1H}	Hold Time for $\overline{A_1}$	0		ns
t_{DS}	Setup Time for DATA	50		ns
t_{DH}	Hold Time for DATA	10		ns
t_{DSOP}	Output Propagation Delay		140	ns
t_{CP}	Clear Pulsewidth	200		ns

TRUTH TABLE

$\overline{A_0}$	$\overline{A_1}$	\overline{CLK}	\overline{CLR}	DESCRIPTION
0	1	$1 \rightarrow 0 \rightarrow 1$	1	Shift Serial Data Into SDI
1	0	$1 \rightarrow 0 \rightarrow 1$	1	Load D/A Latch
1	1	$1 \rightarrow 0 \rightarrow 1$	1	No Change
0	0	$1 \rightarrow 0 \rightarrow 1$	1	Two Wire Operation ⁽¹⁾
X	X	1	1	No Change
X	X	X	0	Reset D/A Latch

NOTES: X = Don't Care. (1) All digital input changes will appear at the output.

TIMING DIAGRAMS



GAIN AND OFFSET ADJUST

Connections Using Potentiometers

GAIN and OFFSET adjust pins provide for trim using external potentiometers. 15-turn potentiometers provide sufficient resolution. Range of adjustment of these trims is at least $\pm 0.3\%$ of Full Scale Range. Refer to Figure 6.

Using D/A Converters

The GAIN ADJUST and OFFSET ADJUST circuits of the DAC714 have been arranged so that these points may be easily driven by external D/A converters. Refer to Figure 7. 12-bit D/A converters provide an OFFSET adjust resolution of $30\mu\text{V}$ to $50\mu\text{V}$ per LSB step.

Nominal values of GAIN and OFFSET occur when the D/A converters outputs are at approximately half scale, +5V.

OUTPUT VOLTAGE RANGE CONNECTIONS

The DAC714 output amplifier is connected internally to provide a 20V output range. For other ranges and configurations, see Figures 6 and 7.

DIGITAL INTERFACE

SERIAL INTERFACE

The DAC714 has a serial interface with two data buffers which can be used for either synchronous or asynchronous updating of multiple D/A converters. $\overline{A0}$ is the enable control for the input shift register. $\overline{A1}$ is the enable for the D/A Latch. \overline{CLK} is used to strobe data into the latches enabled by $\overline{A0}$ and $\overline{A1}$. A CLR function is also provided and when enabled it sets the shift register and the D/A Latch to 0000H (output voltage is midscale).

Multiple DAC714s can be connected to the same \overline{CLK} and data lines in two ways. The output of the serial shift register is available as SDO so that any number of DAC714s can be cascaded on the same input bit stream as shown in Figures 8 and 9. This configuration allows all D/A converters to be updated simultaneously and requires a minimum number of control signals. These configurations do require $16N$ CLK cycles to load any given D/A converter, where N is the number of D/A converters.

The DAC714 can also be connected in parallel as shown in Figure 10. This configuration allows any D/A converter in the system to be updated in a maximum of 16 CLK cycles.

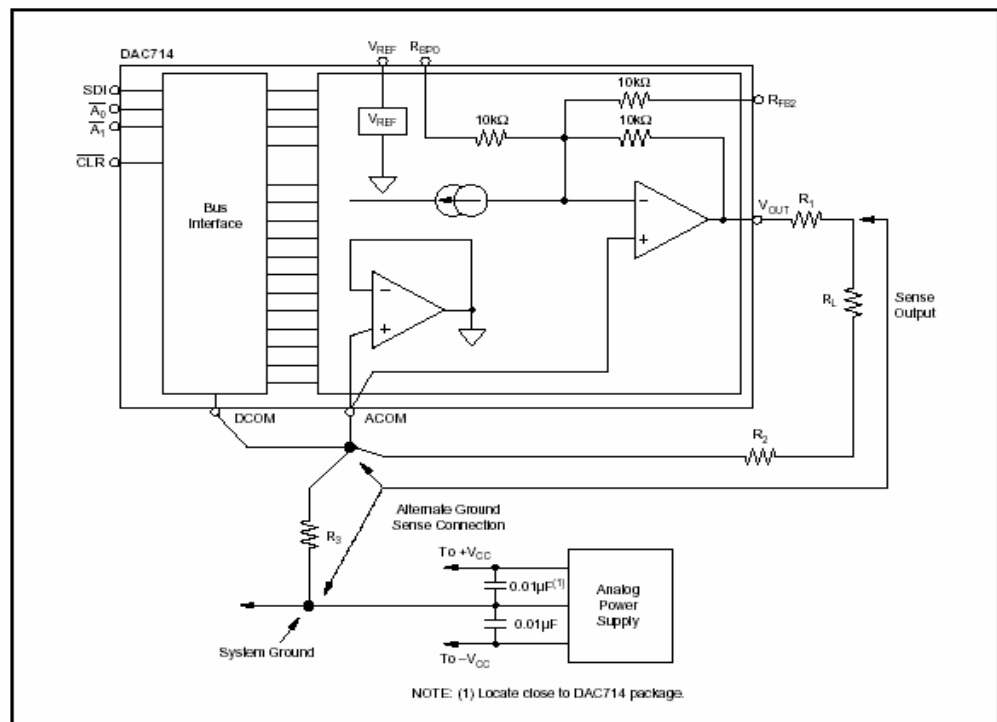


FIGURE 5. System Ground Considerations for High-Resolution D/A Converters.

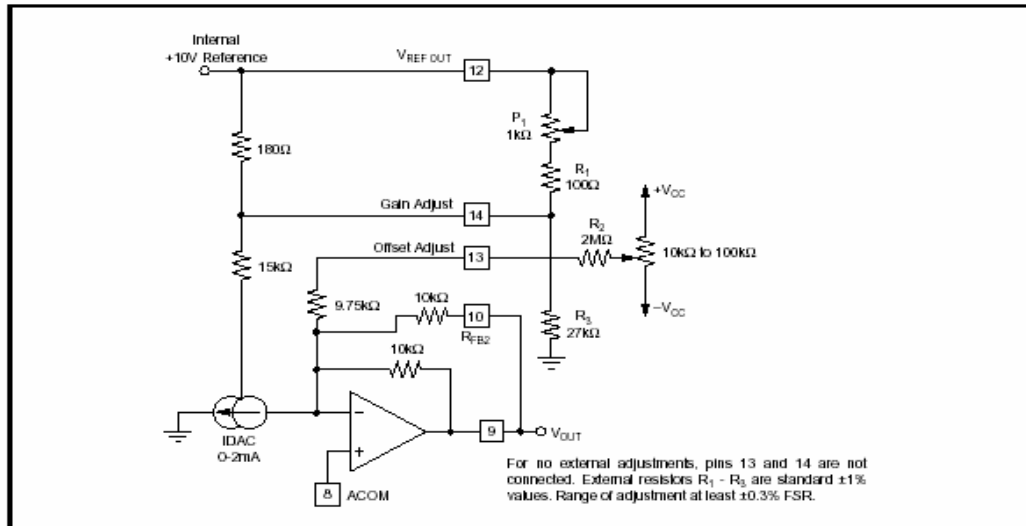


FIGURE 6a. Manual Offset and Gain Adjust Circuits; Unipolar Mode (0V to +10V output range).

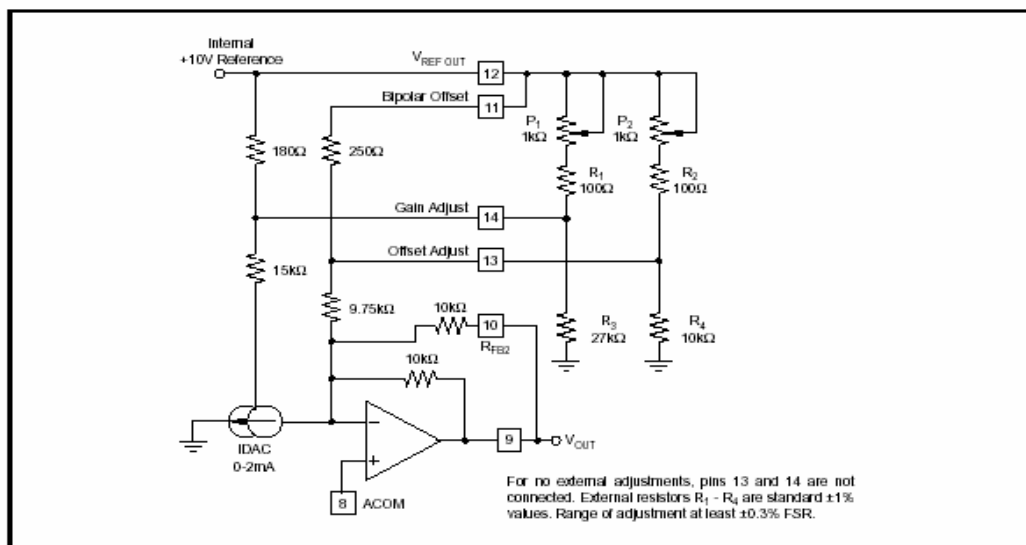


FIGURE 6b. Manual Offset and Gain Adjust Circuits; Bipolar Mode (-5V to +5V output range).

ANEXO G. ADS7813



ADS7813

Low-Power, Serial 16-Bit Sampling ANALOG-TO-DIGITAL CONVERTER

FEATURES

- 20 μ s max CONVERSION TIME
- SINGLE +5V SUPPLY OPERATION
- PIN-COMPATIBLE WITH 12-BIT ADS7812
- EASY-TO-USE SERIAL INTERFACE
- 16-PIN 0.3" PLASTIC DIP AND SOIC
- ± 2.0 LSB max INL
- 87dB min SINAD
- USES INTERNAL OR EXTERNAL REFERENCE
- MULTIPLE INPUT RANGES
- 35mW max POWER DISSIPATION
- NO MISSING CODES
- 50 μ W POWER DOWN MODE

DESCRIPTION

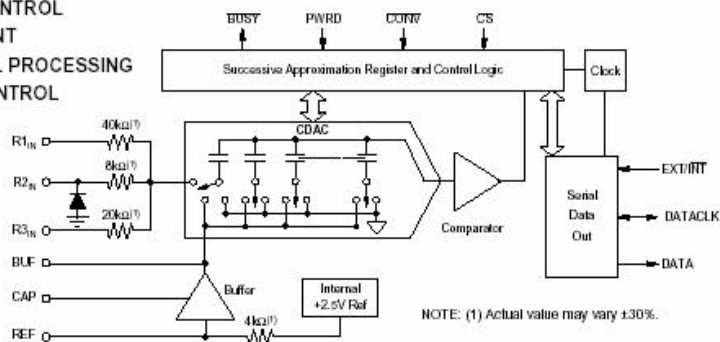
The ADS7813 is a low-power, single +5V supply, 16-bit sampling analog-to-digital converter. It contains a complete 16-bit capacitor-based SAR A/D with a sample/hold, clock, reference, and serial data interface.

The converter can be configured for a variety of input ranges including ± 10 V, ± 5 V, 0V to 10V, and 0.5V to 4.5V. A high impedance 0.3V to 2.8V input range is also available (input impedance > 10 M Ω). For most input ranges, the input voltage can swing to +16.5V or -16.5V without damage to the converter.

A flexible SPI compatible serial interface allows data to be synchronized to an internal or external clock. The ADS7813 is specified at a 40kHz sampling rate over the -40°C to $+85^{\circ}\text{C}$ temperature range. It is available in a 16-pin 0.3" plastic DIP or a 16-lead SOIC package.

APPLICATIONS

- MEDICAL INSTRUMENTATION
- DATA ACQUISITION SYSTEMS
- ROBOTICS
- INDUSTRIAL CONTROL
- TEST EQUIPMENT
- DIGITAL SIGNAL PROCESSING
- DSP SERVO CONTROL



International Airport Industrial Park • Mailing Address: PO Box 11400, Tucson, AZ 85734 • Street Address: 6730 S. Tucson Blvd., Tucson, AZ 85706 • Tel: (520) 746-1111 • Tlx: 910952-1111
Internet: <http://www.burr-brown.com/> • FAXline: (800) 548-6133 (US/Canada Only) • Cable: BURRCORP • Telex: 066-6491 • FAX: (520) 898-1510 • Immediate Product Info: (800) 548-6132

SPECIFICATIONS

At $T_A = -40^{\circ}\text{C}$ to $+85^{\circ}\text{C}$, $f_S = 40\text{kHz}$, $V_S = +5\text{V} \pm 5\%$, using internal reference, unless otherwise specified.

		ADS7813P, U			ADS7813PB, UB									
PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	UNITS						
RESOLUTION				16			*	Bits						
ANALOG INPUT														
Voltage Range			See Table I			*								
Impedance			See Table I			*								
Capacitance			35			*		pF						
THROUGHPUT SPEED														
Conversion Time	Acquire and Convert			20			*	μs						
Complete Cycle				25			*	μs						
Throughput Rate		40			*			kHz						
DC ACCURACY														
Integral Linearity Error	Ext. 2.5000V Ref Ext. 2.5000V Ref Bipolar Ranges Bipolar Ranges Bipolar Zero Error Bipolar Zero Error Drift Unipolar Zero Error Unipolar Zero Error Drift Recovery Time to Rated Accuracy from Power Down ⁽⁴⁾ Power Supply Sensitivity	15		±3	16	*	±2	LSB ⁽¹⁾						
Differential Linearity Error			+3, -2	*		+2, -1	LSB							
No Missing Codes				*			Bits							
Transition Noise ⁽²⁾			0.6	*			LSB							
Full Scale Error ⁽³⁾				±0.5		*	±0.25	%						
Full Scale Error Drift			±14	±0.5		*	±0.25	ppm/°C						
Full Scale Error ⁽³⁾				±0.5		*		%						
Full Scale Error Drift			±5			*		ppm/°C						
Bipolar Zero Error				±10		*	*	mV						
Bipolar Zero Error Drift			±3			*	*	ppm/°C						
Unipolar Zero Error				±6		*	*	mV						
Unipolar Zero Error Drift			±3			*	*	ppm/°C						
Recovery Time to Rated Accuracy from Power Down ⁽⁴⁾			300			*		μs						
Power Supply Sensitivity			+4.75V < (V _S = +5V) < +5.25			±12		*	LSB					
AC ACCURACY														
Spurious-Free Dynamic Range	f _N = 1kHz	90	100	-90	96	102	-96	dB ⁽³⁾						
Total Harmonic Distortion	f _N = 1kHz		-96			-100		dB						
Signal-to-(Noise+Distortion)	f _N = 1kHz	85	89		87	*		dB						
Signal-to-Noise	f _N = 1kHz	85	89		87	*		dB						
Useable Bandwidth ⁽⁵⁾			130			*		kHz						
Full Power -3dB Bandwidth			600			*		kHz						
SAMPLING DYNAMICS														
Aperture Delay	FS Step		40			*		ns						
Aperture Jitter			20			*		ps						
Transient Response			5			*		μs						
Overshoot Recovery ⁽⁷⁾			750			*		ns						
REFERENCE														
Internal Reference Voltage	V _{REF} = +2.5V	2.48	2.5	2.52	*	*	*	V						
Internal Reference Source Current			100		*	*	*	μA						
Internal Reference Drift			8		*	*	*	ppm/°C						
External Reference Voltage Range		2.3	2.5	2.7	*	*	*	V						
External Reference Current Drain				100			*	μA						
DIGITAL INPUTS														
Logic Levels		-0.3 +2.0		+0.8 V _S +0.3V ±10 ±10	*		*	V						
V _{IL}														
V _{IH}														
I _{IL}														
I _{IH}														
DIGITAL OUTPUTS														
Data Format	I _{SINK} = 1.6mA I _{SOURCE} = 500μA High-Z State, V _{OUT} = 0V to V _S High-Z State	+4		Serial			*	V						
Data Coding				Binary Two's Complement										
V _{OL}				+0.4	*									
V _{OH}				±1										
Leakage Current														
Output Capacitance														
				15			15	pF						

SPECIFICATIONS (CONT)

At $T_A = -40^{\circ}\text{C}$ to $+85^{\circ}\text{C}$, $f_S = 40\text{kHz}$, $V_S = +5\text{V} \pm 5\%$, using internal reference, unless otherwise specified.

PARAMETER	CONDITIONS	ADS7813P, U			ADS7813PB, UB			UNITS
		MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
POWER SUPPLY V_S Power Dissipation	$f_S = 40\text{kHz}$	+4.75	+5	+5.25 35	*	*	*	V mW
TEMPERATURE RANGE Specified Performance Derated Performance		-40 -55		+85 +125	*		*	$^{\circ}\text{C}$ $^{\circ}\text{C}$

* Same specification as grade to the left.

NOTES: (1) LSB means Least Significant Bit. For the $\pm 10\text{V}$ input range, one LSB is $305\mu\text{V}$. (2) Typical rms noise at worst case transitions and temperatures. (3) Full scale error is the worst case of -Full Scale or +Full Scale untrimmed deviation from ideal first and last code transitions, divided by the transition voltage (not divided by the full-scale range) and includes the effect of offset error. (4) After the ADS7813 is initially powered on and fully settles, this is the time delay after it is brought out of Power Down Mode until all internal settling occurs and the analog input is acquired to rated accuracy, and normal conversions can begin again. (5) All specifications in dB are referred to a full-scale input. (6) Useable Bandwidth defined as Full-Scale input frequency at which Signal-to-(Noise+Distortion) degrades to 60dB, or 10 bits of accuracy. (7) Recovers to specified performance after $2 \times \text{FS}$ input overvoltage.

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Analog Inputs: $R1_N$	$\pm 16.5\text{V}$
$R2_N$	$\text{GND} - 0.3\text{V}$ to $+16.5\text{V}$
$R3_N$	$\pm 16.5\text{V}$
REF	$\text{GND} - 0.3\text{V}$ to $V_S + 0.3\text{V}$
CAP	Indefinite Short to GND Momentary Short to V_S
V_S	7V
Digital Inputs	$\text{GND} - 0.3\text{V}$ to $V_S + 0.3\text{V}$
Maximum Junction Temperature	$+165^{\circ}\text{C}$
Internal Power Dissipation	825mW
Lead Temperature (soldering, 10s)	$+300^{\circ}\text{C}$



ELECTROSTATIC DISCHARGE SENSITIVITY

This integrated circuit can be damaged by ESD. Burr-Brown recommends that all integrated circuits be handled with appropriate precautions. Failure to observe proper handling and installation procedures can cause damage.

ESD damage can range from subtle performance degradation to complete device failure. Precision integrated circuits may be more susceptible to damage because very small parametric changes could cause the device not to meet its published specifications.

PACKAGE/ORDERING INFORMATION

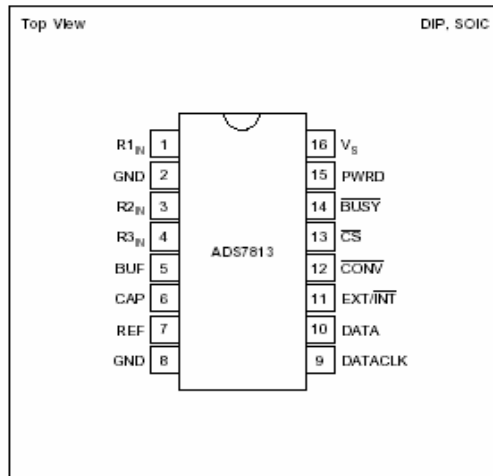
PRODUCT	MAXIMUM INTEGRAL LINEARITY ERROR (LSB)	GUARANTEED NO MISSING CODE LEVEL (LSB)	MINIMUM SIGNAL-TO-(NOISE + DISTORTION) RATIO (dB)	SPECIFICATION TEMPERATURE RANGE	PACKAGE	PACKAGE DRAWING NUMBER ⁽¹⁾
ADS7813P	± 3	15	85	-40°C to $+85^{\circ}\text{C}$	Plastic DIP	180
ADS7813PB	± 2	16	87	-40°C to $+85^{\circ}\text{C}$	Plastic DIP	180
ADS7813U	± 3	15	85	-40°C to $+85^{\circ}\text{C}$	SOIC	211
ADS7813UB	± 2	16	87	-40°C to $+85^{\circ}\text{C}$	SOIC	211

NOTE: (1) For detailed drawing and dimension table, please see end of data sheet, or Appendix C of Burr-Brown IC Data Book.

PIN CONFIGURATION

PIN #	NAME	DESCRIPTION
1	R1 _N	Analog Input. See Tables I and IV.
2	GND	Ground
3	R2 _N	Analog Input. See Tables I and IV.
4	R3 _N	Analog Input. See Tables I and IV.
5	BUF	Reference Buffer Output. Connect to R1 _N , R2 _N , or R3 _N , as needed.
6	CAP	Reference Buffer Compensation Node. Decouple to ground with a 1μF tantalum capacitor in parallel with a 0.01μF ceramic capacitor.
7	REF	Reference Input/Output. Outputs internal +2.5V reference via a series 4kΩ resistor. Decouple this voltage with a 1μF to 2.2μF tantalum capacitor to ground. If an external reference voltage is applied to this pin, it will override the internal reference.
8	GND	Ground
9	DATACLK	Data Clock Pin. With EXT/INT LOW, this pin is an output and provides the synchronous clock for the serial data. The output is tri-stated when CS is HIGH. With EXT/INT HIGH, this pin is an input and the serial data clock must be provided externally.
10	DATA	Serial Data Output. The serial data is always the result of the last completed conversion and is synchronized to DATACLK. If DATACLK is from the internal clock (EXT/INT LOW), the serial data is valid on both the rising and falling edges of DATACLK. DATA is tri-stated when CS is HIGH.
11	EXT/INT	External or Internal DATACLK Pin. Selects the source of the synchronous clock for serial data. If HIGH, the clock must be provided externally. If LOW, the clock is derived from the internal conversion clock. Note that the clock used to time the conversion is always internal regardless of the status of EXT/INT.
12	CONV	Convert Input. A falling edge on this input puts the internal sample/hold into the hold state and starts a conversion regardless of the state of CS. If a conversion is already in progress, the falling edge is ignored. If EXT/INT is LOW, data from the previous conversion will be serially transmitted during the current conversion.
13	CS	Chip Select. This input tri-states all outputs when HIGH and enables all outputs when LOW. This includes DATA, <u>BUSY</u> , and DATACLK (when EXT/INT is LOW). Note that a falling edge on <u>CONV</u> will initiate a conversion even when CS is HIGH.
14	<u>BUSY</u>	Busy Output. When a conversion is started, <u>BUSY</u> goes LOW and remains LOW throughout the conversion. If EXT/INT is LOW, data is serially transmitted while <u>BUSY</u> is LOW. <u>BUSY</u> is tri-stated when CS is HIGH.
15	PWRD	Power Down Input. When HIGH, the majority of the ADS7813 is placed in a low power mode and power consumption is significantly reduced. <u>CONV</u> must be taken LOW prior to PWRD going LOW in order to achieve the lowest power consumption. The time required for the ADS7813 to return to normal operation after power down depends on a number of factors. Consult the Power Down section for more information.
16	V _S	+5V Supply Input. For best performance, decouple to ground with a 0.1μF ceramic capacitor in parallel with a 10μF tantalum capacitor.

PIN CONFIGURATION



ANALOG INPUT RANGE (V)	CONNECT R1 _N TO	CONNECT R2 _N TO	CONNECT R3 _N TO	INPUT IMPEDANCE (kΩ)
±10V	V _N	BUF	GND	45.7
0.3125V to 2.8125V	V _N	V _N	V _N	> 10,000
±5V	GND	BUF	V _N	26.7
0V to 10V	BUF	GND	V _N	26.7
0V to 4V	BUF	V _N	GND	21.3
±3.33V	V _N	BUF	V _N	21.3
0.5V to 4.5V	GND	V _N	GND	21.3

TABLE I. ADS7813 Input Ranges.

External DATACLK Active After the Conversion and During the Next Conversion

Figure 8 shows a method that is a hybrid of the two previous approaches. This method works very well for microcontrollers that do serial transfers 8 bits at a time and for slower microcontrollers. For example, if the fastest serial clock that the microcontroller can produce is 1μs, the approach shown in Figure 6 would result in a diminished throughput (26kHz maximum conversion rate). The method described in Figure 7 could not be used without risk of affecting the conversion result (the clock would have to be active after time t_2). The approach in Figure 8 results in an improved throughput rate (33kHz maximum with a 1μs clock) and DATACLK is not active after time t_2 .

COMPATIBILITY WITH THE ADS7812

The only difference between the ADS7812 and the ADS7813 is in the internal control logic and the digital interface. Since the ADS7812 is a 12-bit converter, the internal shift register is 12 bits wide. In addition, only 12-bit decisions are made during the conversion. Thus, the ADS7812's conversion time is approximately 75% of the ADS7813's.

In the internal DATACLK mode, the ADS7812 produces 12 DATACLK periods during the conversion instead of the ADS7813's 16 (see Figure 5). In the external DATACLK mode, the ADS7812 can accept 16 clock periods on DATACLK. At the start of the 13th clock cycle, the DATA output will go LOW and remain LOW. Thus, Figures 6, 7, 8, and the associated times in Table II can also be used for the ADS7812, but the last four bits of the conversion result will be zero.

CHIP SELECT (\overline{CS})

The \overline{CS} input allows the digital outputs of the ADS7812 to be disabled and gates the external DATACLK signal when EXT/INT is HIGH. See Figure 9 for the enable and disable time associated with \overline{CS} and Figure 3 for a block diagram of the ADS7813's logic. The digital outputs can be disabled at any time.

Note that a conversion is initiated on the falling edge of \overline{CONV} even if \overline{CS} is HIGH. If the EXT/INT input is LOW (internal DATACLK) and \overline{CS} is HIGH during the entire conversion, the previous conversion result will be lost (the serial transmission occurs but DATA and DATACLK are disabled).

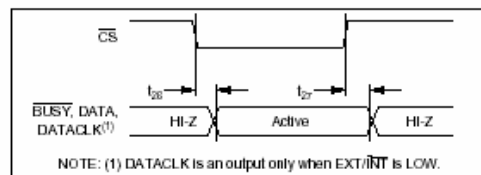


FIGURE 9. Enable and Disable Timing for Digital Outputs.

ANALOG INPUT

The ADS7813 offers a number of input ranges. This is accomplished by connecting the three input resistors to either the analog input (V_{IN}), to ground (GND), or to the 2.5V reference buffer output (BUF). Table I shows the input ranges that are typically used in most data acquisition applications. These ranges are all guaranteed to meet the specifications given in the Specifications table. Table IV contains a complete list of ideal input ranges, associated input connections, and comments regarding the range.

ANALOG INPUT RANGE (V)	CONNECT R _{1IN} TO	CONNECT R _{2IN} TO	CONNECT R _{3IN} TO	INPUT IMPEDANCE (kΩ)	COMMENT
0.3125 to 2.8125	V_{IN}	V_{IN}	V_{IN}	> 10,000	Guaranteed offset and gain
-0.417 to 2.916	V_{IN}	V_{IN}	BUF	26.7	V_{IN} cannot go below GND - 0.3V
0.417 to 3.750	V_{IN}	V_{IN}	GND	26.7	Offset and gain not guaranteed
±3.333	V_{IN}	BUF	V_{IN}	21.3	Guaranteed offset and gain
-15 to 5	V_{IN}	BUF	BUF	45.7	Offset and gain not guaranteed
±10	V_{IN}	BUF	GND	45.7	Guaranteed offset and gain
0.833 to 7.5	V_{IN}	GND	V_{IN}	21.3	Offset and gain not guaranteed
-2.5 to 17.5	V_{IN}	GND	BUF	45.7	Exceeds absolute maximum V_{IN}
2.5 to 22.5	V_{IN}	GND	GND	45.7	Exceeds absolute maximum V_{IN}
0 to 2.857	BUF	V_{IN}	V_{IN}	45.7	Offset and gain not guaranteed
-1 to 3	BUF	V_{IN}	BUF	21.3	V_{IN} cannot go below GND - 0.3V
0 to 4	BUF	V_{IN}	GND	21.3	Guaranteed offset and gain
-6.25 to 3.75	BUF	BUF	V_{IN}	26.7	Offset and gain not guaranteed
0 to 10	BUF	GND	V_{IN}	26.7	Guaranteed offset and gain
0.357 to 3.214	GND	V_{IN}	V_{IN}	45.7	Offset and gain not guaranteed
-0.5 to 3.5	GND	V_{IN}	BUF	21.3	V_{IN} cannot go below GND - 0.3V
0.5 to 4.5	GND	V_{IN}	GND	21.3	Guaranteed offset and gain
±5	GND	BUF	V_{IN}	26.7	Guaranteed offset and gain
1.25 to 11.25	GND	GND	V_{IN}	26.7	Offset and gain not guaranteed

TABLE IV. Complete List of Ideal Input Ranges.

ANEXO H. INA128



INA128
INA129

Precision, Low Power INSTRUMENTATION AMPLIFIERS

FEATURES

- LOW OFFSET VOLTAGE: 50µV max
- LOW DRIFT: 0.5µV/°C max
- LOW INPUT BIAS CURRENT: 5nA max
- HIGH CMR: 120dB min
- INPUTS PROTECTED TO ±40V
- WIDE SUPPLY RANGE: ±2.25 to ±18V
- LOW QUIESCENT CURRENT: 700µA
- 8-PIN PLASTIC DIP, SO-8

APPLICATIONS

- BRIDGE AMPLIFIER
- THERMOCOUPLE AMPLIFIER
- RTD SENSOR AMPLIFIER
- MEDICAL INSTRUMENTATION
- DATA ACQUISITION

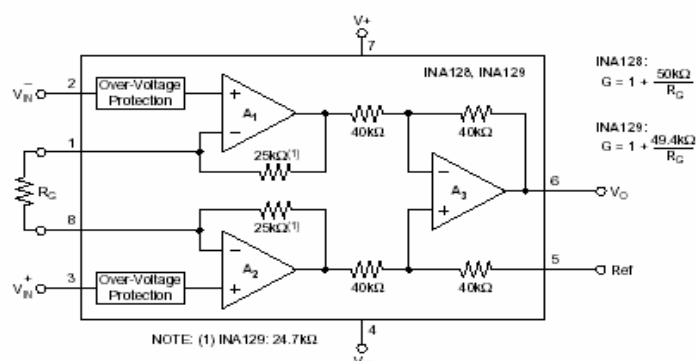
DESCRIPTION

The INA128 and INA129 are low power, general purpose instrumentation amplifiers offering excellent accuracy. Their versatile 3-op amp design and small size make them ideal for a wide range of applications. Current-feedback input circuitry provides wide bandwidth even at high gain (200kHz at $G = 100$).

A single external resistor sets any gain from 1 to 10,000. INA128 provides an industry standard gain equation; INA129's gain equation is compatible with the AD620.

The INA128/INA129 is laser trimmed for very low offset voltage (50µV), drift (0.5µV/°C) and high common-mode rejection (120dB at $G \geq 100$). It operates with power supplies as low as ±2.25V, and quiescent current is only 700µA—ideal for battery operated systems. Internal input protection can withstand up to ±40V without damage.

The INA128/INA129 is available in 8-pin plastic DIP, and SO-8 surface-mount packages, specified for the -40°C to +85°C temperature range. The INA128 is also available in dual configuration, the INA2128.

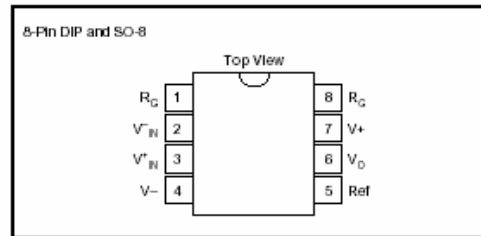


SPECIFICATIONS

At $T_A = +25^\circ\text{C}$, $V_S = \pm 15\text{V}$, $R_L = 10\text{k}\Omega$, unless otherwise noted.

PARAMETER	CONDITIONS	INA128P, U INA129P, U			INA128PA, UA INA129PA, UA			UNITS
		MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
INPUT Offset Voltage, RTI Initial vs Temperature vs Power Supply Long-Term Stability Impedance, Differential Common-Mode Common-Mode Voltage Range ⁽¹⁾	$T_A = +25^\circ\text{C}$ $T_A = T_{MIN}$ to T_{MAX} $V_S = \pm 2.25\text{V}$ to $\pm 18\text{V}$ $V_O = 0\text{V}$		$\pm 10 \pm 100/\text{G}$ $\pm 0.2 \pm 2/\text{G}$ $\pm 0.2 \pm 20/\text{G}$ $\pm 0.1 \pm 3/\text{G}$ $10^{10} \parallel 2$ $10^{11} \parallel 9$ $(V^+) - 1.4$ $(V^-) + 1.7$	$\pm 50 \pm 500/\text{G}$ $\pm 0.5 \pm 20/\text{G}$ $\pm 1 \pm 100/\text{G}$		$\pm 25 \pm 100/\text{G}$ $\pm 0.2 \pm 5/\text{G}$ *	$\pm 125 \pm 1000/\text{G}$ $\pm 1 \pm 20/\text{G}$ $\pm 2 \pm 200/\text{G}$	μV $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ $\mu\text{V}/\text{V}$ $\mu\text{V}/\text{mo}$ $\Omega \parallel \text{pF}$ $\Omega \parallel \text{pF}$ V V V
Safe Input Voltage Common-Mode Rejection	$V_{CM} = \pm 13\text{V}$, $\Delta R_S = 1\text{k}\Omega$ $G=1$ $G=10$ $G=100$ $G=1000$			± 40	*	*	*	dB dB dB dB
BIAS CURRENT vs Temperature Offset Current vs Temperature			± 2 ± 30 ± 1 ± 30	± 5 ± 5		*	± 10 ± 10	nA $\text{pA}/^\circ\text{C}$ nA $\text{pA}/^\circ\text{C}$
NOISE VOLTAGE, RTI $f = 10\text{Hz}$ $f = 100\text{Hz}$ $f = 1\text{kHz}$ $f_b = 0.1\text{Hz}$ to 10Hz Noise Current $f = 10\text{Hz}$ $f = 1\text{kHz}$ $f_b = 0.1\text{Hz}$ to 10Hz	$G = 1000$, $R_S = 0\Omega$		10 8 8 0.2 0.9 0.3 30			*		$\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ $\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ $\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ $\mu\text{V}/\text{p-p}$ $\text{pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ $\text{pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ $\text{pA}/\text{p-p}$
GAIN Gain Equation, INA128 INA129 Range of Gain Gain Error	$G=1$ $G=10$ $G=100$ $G=1000$ $G=1$	1	$1 + (50\text{k}\Omega/R_G)$ $1 + (49.4\text{k}\Omega/R_G)$ ± 0.01 ± 0.02 ± 0.05 ± 0.5 ± 1	10000 ± 0.024 ± 0.4 ± 0.5 ± 1 ± 10 ± 100	*	*	*	V/V V/V V/V % % % % %
Gain vs Temperature ⁽²⁾ 50k Ω (or 49.4k Ω) Resistance ^(2,3) Nonlinearity	$V_O = \pm 13.6\text{V}$, $G=1$ $G=10$ $G=100$ $G=1000$		± 1 ± 25 ± 0.0001 ± 0.0003 ± 0.0005 ± 0.001	± 10 ± 100 ± 0.001 ± 0.002 ± 0.002 (Note 4)		*	± 0.002 ± 0.004 ± 0.004 *	$\text{ppm}/^\circ\text{C}$ $\text{ppm}/^\circ\text{C}$ % of FSR % of FSR % of FSR
OUTPUT Voltage: Positive Negative Load Capacitance Stability Short-Circuit Current	$R_L = 10\text{k}\Omega$ $R_L = 10\text{k}\Omega$	$(V^+) - 1.4$ $(V^-) + 1.4$	$(V^+) - 0.9$ $(V^-) + 0.8$ 1000 +6/-15		*	*	*	V V pF mA
FREQUENCY RESPONSE Bandwidth -3dB Slew Rate Settling Time, 0.01% Overload Recovery	$G=1$ $G=10$ $G=100$ $G=1000$ $V_O = \pm 10\text{V}$, $G=10$ $G=1$ $G=10$ $G=100$ $G=1000$ 50% Overdrive		1.3 700 200 20 4 7 9 80 4			*	*	MHz kHz kHz kHz $\text{V}/\mu\text{s}$ μs μs μs μs
POWER SUPPLY Voltage Range Current, Total	$V_{IN} = 0\text{V}$	± 2.25	± 15 ± 700	± 18 ± 750	*	*	*	V μA
TEMPERATURE RANGE Specification Operating R_{JA} 8-Pin Dip SO-8 SOIC		-40 -40	80 80 150	85 125	*	*	*	$^\circ\text{C}$ $^\circ\text{C}$ $^\circ\text{C}/\text{W}$ $^\circ\text{C}/\text{W}$

PIN CONFIGURATION



ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Supply Voltage	$\pm 18V$
Analog Input Voltage Range	$\pm 40V$
Output Short-Circuit (to ground)	Continuous
Operating Temperature	$-40^{\circ}C$ to $+125^{\circ}C$
Storage Temperature	$-40^{\circ}C$ to $+125^{\circ}C$
Junction Temperature	$+150^{\circ}C$
Lead Temperature (soldering, 10s)	$+300^{\circ}C$



ELECTROSTATIC DISCHARGE SENSITIVITY

This integrated circuit can be damaged by ESD. Burr-Brown recommends that all integrated circuits be handled with appropriate precautions. Failure to observe proper handling and installation procedures can cause damage.

ESD damage can range from subtle performance degradation to complete device failure. Precision integrated circuits may be more susceptible to damage because very small parametric changes could cause the device not to meet its published specifications.

ORDERING INFORMATION

PRODUCT	PACKAGE	PACKAGE DRAWING NUMBER(1)	TEMPERATURE RANGE
INA128PA	8-Pin Plastic DIP	006	$-40^{\circ}C$ to $+85^{\circ}C$
INA128P	8-Pin Plastic DIP	006	$-40^{\circ}C$ to $+85^{\circ}C$
INA128UA	SO-8 Surface-Mount	182	$-40^{\circ}C$ to $+85^{\circ}C$
INA128U	SO-8 Surface-Mount	182	$-40^{\circ}C$ to $+85^{\circ}C$
INA129PA	8-Pin Plastic DIP	006	$-40^{\circ}C$ to $+85^{\circ}C$
INA129P	8-Pin Plastic DIP	006	$-40^{\circ}C$ to $+85^{\circ}C$
INA129UA	SO-8 Surface-Mount	182	$-40^{\circ}C$ to $+85^{\circ}C$
INA129U	SO-8 Surface-Mount	182	$-40^{\circ}C$ to $+85^{\circ}C$

NOTE: (1) For detailed drawing and dimension table, please see end of data sheet, or Appendix C of Burr-Brown IC Data Book.

ANEXO I. MAX232

MAXIM**±15kV ESD-Protected, +5V RS-232 Transceivers****General Description**

The MAX202E-MAX213E, MAX232E/MAX241E line drivers/receivers are designed for RS-232 and V.28 communications in harsh environments. Each transmitter output and receiver input is protected against ±15kV electrostatic discharge (ESD) shocks, without latchup. The various combinations of features are outlined in the *Selection Guide*. The drivers and receivers for all ten devices meet all EIA/TIA-232E and CCITT V.28 specifications at data rates up to 120kbps, when loaded in accordance with the EIA/TIA-232E specification.

The MAX211E/MAX213E/MAX241E are available in 28-pin SO packages, as well as a 28-pin SSOP that uses 60% less board space. The MAX202E/MAX232E come in 16-pin narrow SO, wide SO, and DIP packages. The MAX203E comes in a 20-pin DIP/SO package, and needs no external charge-pump capacitors. The MAX205E comes in a 24-pin wide DIP package, and also eliminates external charge-pump capacitors. The MAX206E/MAX207E/MAX208E come in 24-pin SO, SSOP, and narrow DIP packages. The MAX232E/MAX241E operate with four 1µF capacitors, while the MAX202E/MAX206E/MAX207E/MAX208E/MAX211E/MAX213E operate with four 0.1µF capacitors, further reducing cost and board space.

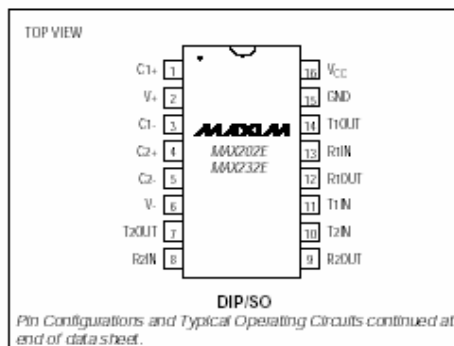
Applications

Notebook, Subnotebook, and Palmtop Computers
Battery-Powered Equipment
Hand-Held Equipment

Ordering Information appears at end of data sheet.

Features

- ♦ ESD Protection for RS-232 I/O Pins:
±15kV—Human Body Model
±8kV—IEC1000-4-2, Contact Discharge
±15kV—IEC1000-4-2, Air-Gap Discharge
- ♦ Latchup Free (unlike bipolar equivalents)
- ♦ Guaranteed 120kbps Data Rate—LapLink™ Compatible
- ♦ Guaranteed 3V/µs Min Slew Rate
- ♦ Operate from a Single +5V Power Supply

Pin Configurations**Selection Guide**

PART	No. of RS-232 DRIVERS	No. of RS-232 RECEIVERS	RECEIVERS ACTIVE IN SHUTDOWN	No. of EXTERNAL CAPACITORS	LOW-POWER SHUTDOWN	TTL THREE-STATE
MAX202E	2	2	0	4 (0.1µF)	No	No
MAX203E	2	2	0	None	No	No
MAX205E	5	5	0	None	Yes	Yes
MAX206E	4	3	0	4 (0.1µF)	Yes	Yes
MAX207E	5	3	0	4 (0.1µF)	No	No
MAX208E	4	4	0	4 (0.1µF)	No	No
MAX211E	4	5	0	4 (0.1µF)	Yes	Yes
MAX213E	4	5	2	4 (0.1µF)	Yes	Yes
MAX232E	2	2	0	4 (1µF)	No	No
MAX241E	4	5	0	4 (1µF)	Yes	Yes

LapLink is a registered trademark of Traveling Software, Inc.

MAXIM

Maxim Integrated Products 1

For free samples & the latest literature: <http://www.maxim-ic.com>, or phone 1-800-998-8800

MAX202E-MAX213E, MAX232E/MAX241E

±15kV ESD-Protected, +5V RS-232 Transceivers**ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS**

V _{CC}	-0.3V to +6V	20-Pin SO (derate 10.00mW/°C above +70°C)	800mW
V ₊	(V _{CC} - 0.3V) to +14V	24-Pin Narrow Plastic DIP	
V ₋	-14V to +0.3V	(derate 13.33mW/°C above +70°C)	1.07W
Input Voltages			
T _{IN}	-0.3V to (V ₊ + 0.3V)	24-Pin Wide Plastic DIP	
R _{IN}	±30V	(derate 14.29mW/°C above +70°C)	1.14W
Output Voltages			
T _{OUT}	(V ₋ - 0.3V) to (V ₊ + 0.3V)	24-Pin SO (derate 11.76mW/°C above +70°C)	941mW
R _{OUT}	-0.3V to (V _{CC} + 0.3V)	24-Pin SSOP (derate 8.00mW/°C above +70°C)	640mW
Short-Circuit Duration, T _{OUT}			
Continuous Power Dissipation (T _A = +70°C)			
16-Pin Plastic DIP (derate 10.53mW/°C above +70°C)	842mW	28-Pin SO (derate 12.50mW/°C above +70°C)	1W
16-Pin Narrow SO (derate 8.70mW/°C above +70°C)	696mW	28-Pin SSOP (derate 9.52mW/°C above +70°C)	762mW
16-Pin Wide SO (derate 9.52mW/°C above +70°C)	762mW	Operating Temperature Ranges	
20-Pin Plastic DIP (derate 11.11mW/°C above +70°C)	889mW	MAX2 _{XX} _EC	0°C to +70°C
		MAX2 _{XX} _EE	-40°C to +85°C
		Storage Temperature Range	
		Lead Temperature (soldering, 10sec)	

Stresses beyond those listed under "Absolute Maximum Ratings" may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, and functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated in the operational sections of the specifications is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

(V_{CC} = +5V ±10% for MAX202E/205E/208E/211E/213E/232E/241E; V_{CC} = +5V ±5% for MAX203E/205E/207E; C1-C4 = 0.1µF for MAX202E/205E/207E/208E/211E/213E; C1-C4 = 1µF for MAX232E/241E; T_A = T_{MIN} to T_{MAX}; unless otherwise noted. Typical values are at T_A = +25°C.)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS		MIN	TYP	MAX	UNITS
DC CHARACTERISTICS							
V _{CC} Supply Current	I _{CC}	No load, T _A = +25°C	MAX202E/203E	8	15	mA	
			MAX205E-208E	11	20		
			MAX211E/213E	14	20		
			MAX232E	5	10		
			MAX241E	7	15		
Shutdown Supply Current		T _A = +25°C, Figure 1	MAX205E/206E	1	10	µA	
			MAX211E/241E	1	10		
			MAX213E	15	50		
LOGIC							
Input Pull-Up Current		T _{IN} = 0V (MAX205E-208E/211E/213E/241E)		15	200	µA	
Input Leakage Current		T _{IN} = 0V to V _{CC} (MAX202E/203E/232E)			±10	µA	
Input Threshold Low	V _{IL}	T _{IN} ; EN, $\overline{\text{SHDN}}$ (MAX213E) or $\overline{\text{EN}}$, SHDN (MAX205E-208E/211E/241E)			0.8	V	
Input Threshold High	V _{IH}	T _{IN}		2.0		V	
		EN, $\overline{\text{SHDN}}$ (MAX213E) or $\overline{\text{EN}}$, SHDN (MAX205E-208E/211E/241E)		2.4			
Output Voltage Low	V _{OL}	R _{OUT} ; I _{OUT} = 3.2mA (MAX202E/203E/232E) or I _{OUT} = 1.6mA (MAX205E/208E/211E/213E/241E)			0.4	V	
Output Voltage High	V _{OH}	R _{OUT} ; I _{OUT} = -1.0mA		3.5	V _{CC} - 0.4	V	
Output Leakage Current		$\overline{\text{EN}}$ = V _{CC} , EN = 0V, 0V ≤ R _{OUT} ≤ V _{CC} , MAX205E-208E/211E/213E/241E outputs disabled		±0.05	±10	µA	

±15kV ESD-Protected, +5V RS-232 Transceivers

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (continued)

(V_{CC} = +5V ±10% for MAX202E/206E/208E/211E/213E/232E/241E; V_{CC} = +5V ±5% for MAX203E/205E/207E; C1–C4 = 0.1μF for MAX202E/206E/207E/208E/211E/213E; C1–C4 = 1μF for MAX232E/241E; T_A = T_{MIN} to T_{MAX}; unless otherwise noted. Typical values are at T_A = +25°C.)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
EIA/TIA-232E RECEIVER INPUTS						
Input Voltage Range			-30		30	V
Input Threshold Low		T _A = +25°C, V _{CC} = 5V	All parts, normal operation	0.8	1.2	V
			MAX213E, $\overline{\text{SHDN}}$ = 0V, EN = V _{CC}	0.6	1.5	
Input Threshold High		T _A = +25°C, V _{CC} = 5V	All parts, normal operation	1.7	2.4	V
			MAX213E (R4, R5), $\overline{\text{SHDN}}$ = 0V, EN = V _{CC}	1.5	2.4	
Input Hysteresis		V _{CC} = 5V, no hysteresis in shutdown	0.2	0.5	1.0	V
Input Resistance		T _A = +25°C, V _{CC} = 5V	3	5	7	kΩ
EIA/TIA-232E TRANSMITTER OUTPUTS						
Output Voltage Swing		All drivers loaded with 3kΩ to ground (Note 1)	±5	±9		V
Output Resistance		V _{CC} = V ₊ = V ₋ = 0V, V _{OUT} = ±2V	300			Ω
Output Short-Circuit Current				±10	±60	mA
TIMING CHARACTERISTICS						
Maximum Data Rate		R _L = 3kΩ to 7kΩ, C _L = 50pF to 1000pF, one transmitter switching	120			kbps
Receiver Propagation Delay	t _{PLHR} , t _{PHLR}	C _L = 150pF	All parts, normal operation	0.5	10	μs
			MAX213E (R4, R5), $\overline{\text{SHDN}}$ = 0V, EN = V _{CC}	4	40	
Receiver Output Enable Time		MAX205E/206E/211E/213E/241E normal operation, Figure 2		600		ns
Receiver Output Disable Time		MAX205E/206E/211E/213E/241E normal operation, Figure 2		200		ns
Transmitter Propagation Delay	t _{PLHT} , t _{PHLT}	R _L = 3kΩ, C _L = 2500pF, all transmitters loaded		2		μs
Transition-Region Slew Rate		T _A = +25°C, V _{CC} = 5V, R _L = 3kΩ to 7kΩ, C _L = 50pF to 1000pF, measured from -3V to +3V or +3V to -3V, Figure 3	3	6	30	V/μs
ESD PERFORMANCE: TRANSMITTER OUTPUTS, RECEIVER INPUTS						
ESD-Protection Voltage		Human Body Model		±15		kV
		IEC1000-4-2, Contact Discharge		±8		
		IEC1000-4-2, Air-Gap Discharge		±15		

Note 1: MAX211EE_ tested with V_{CC} = +5V ±5%.

MAX202E-MAX213E, MAX232E/MAX241E

ANEXO J. TL082

TL081, TL081A, TL081B, TL082, TL082A, TL082B
 TL082Y, TL084, TL084A, TL084B, TL084Y
JFET-INPUT OPERATIONAL AMPLIFIERS
SLOS081E – FEBRUARY 1977 – REVISED FEBRUARY 1999

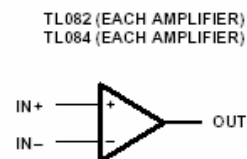
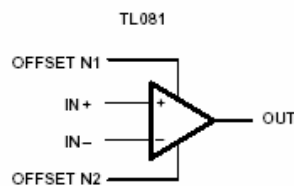
- Low Power Consumption
- Wide Common-Mode and Differential Voltage Ranges
- Low Input Bias and Offset Currents
- Output Short-Circuit Protection
- Low Total Harmonic Distortion . . . 0.003% Typ
- High Input Impedance . . . JFET-Input Stage
- Latch-Up-Free Operation
- High Slew Rate . . . 13 V/ μ s Typ
- Common-Mode Input Voltage Range Includes V_{CC+}

description

The TL08x JFET-input operational amplifier family is designed to offer a wider selection than any previously developed operational amplifier family. Each of these JFET-input operational amplifiers incorporates well-matched, high-voltage JFET and bipolar transistors in a monolithic integrated circuit. The devices feature high slew rates, low input bias and offset currents, and low offset voltage temperature coefficient. Offset adjustment and external compensation options are available within the TL08x family.

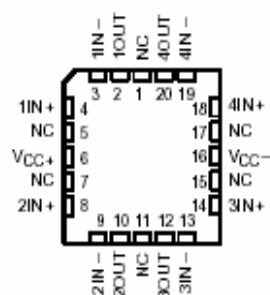
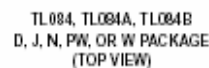
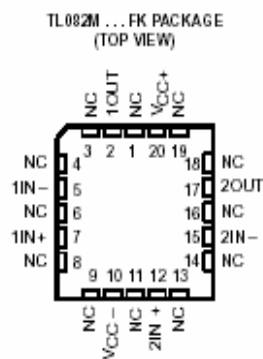
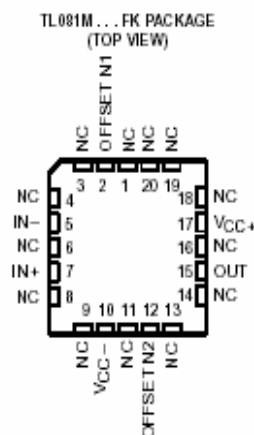
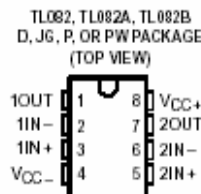
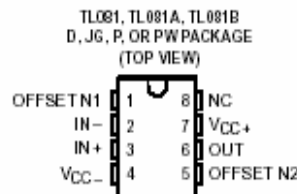
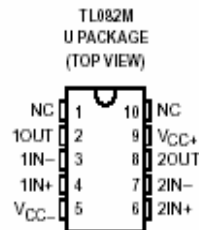
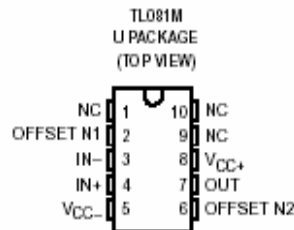
The C-suffix devices are characterized for operation from 0°C to 70°C. The I-suffix devices are characterized for operation from –40°C to 85°C. The Q-suffix devices are characterized for operation from –40°C to 125°C. The M-suffix devices are characterized for operation over the full military temperature range of –55°C to 125°C.

symbols



TL081, TL081A, TL081B, TL082, TL082A, TL082B
 TL082Y, TL084, TL084A, TL084B, TL084Y
 JFET-INPUT OPERATIONAL AMPLIFIERS

SL08061E—FEBRUARY 1977—REVISED FEBRUARY 1989



NC - No internal connection

ANEXO K. CD4051

CD4051BM/CD4051BC Single 8-Channel Analog Multiplexer/Demultiplexer **CD4052BM/CD4052BC Dual 4-Channel Analog Multiplexer/Demultiplexer** **CD4053BM/CD4053BC Triple 2-Channel Analog Multiplexer/Demultiplexer**

General Description

These analog multiplexers/demultiplexers are digitally controlled analog switches having low "ON" impedance and very low "OFF" leakage currents. Control of analog signals up to 15V_{pp} can be achieved by digital signal amplitudes of 3–15V. For example, if V_{DD} = 5V, V_{SS} = 0V and V_{EE} = –5V, analog signals from –5V to +5V can be controlled by digital inputs of 0–5V. The multiplexer circuits dissipate extremely low quiescent power over the full V_{DD}–V_{SS} and V_{DD}–V_{EE} supply voltage ranges, independent of the logic state of the control signals. When a logical "1" is present at the inhibit input terminal all channels are "OFF".

CD4051BM/CD4051BC is a single 8-channel multiplexer having three binary control inputs, A, B, and C, and an inhibit input. The three binary signals select 1 of 8 channels to be turned "ON" and connect the input to the output.

CD4052BM/CD4052BC is a differential 4-channel multiplexer having two binary control inputs, A and B, and an inhibit input. The two binary input signals select 1 or 4 pairs of channels to be turned on and connect the differential analog inputs to the differential outputs.

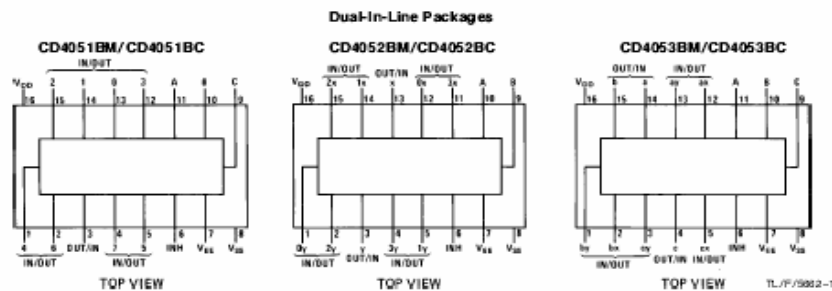
CD4053BM/CD4053BC is a triple 2-channel multiplexer having three separate digital control inputs, A, B, and C, and

an inhibit input. Each control input selects one of a pair of channels which are connected in a single-pole double-throw configuration.

Features

- Wide range of digital and analog signal levels: digital 3–15V, analog to 15V_{pp}
- Low "ON" resistance: 80Ω (typ.) over entire 15V_{pp} signal-input range for V_{DD}–V_{EE} = 15V
- High "OFF" resistance: channel leakage of ±10 pA (typ.) at V_{DD}–V_{EE} = 10V
- Logic level conversion for digital addressing signals of 3–15V (V_{DD}–V_{SS} = 3–15V) to switch analog signals to 15 V_{pp} (V_{DD}–V_{EE} = 15V)
- Matched switch characteristics: ΔR_{ON} = 5Ω (typ.) for V_{DD}–V_{EE} = 15V
- Very low quiescent power dissipation under all digital-control input and supply conditions: 1 μW (typ.) at V_{DD}–V_{SS} = V_{DD}–V_{EE} = 10V
- Binary address decoding on chip

Connection Diagrams



Order Number CD4051B, CD4052B, or CD4053B

If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office/Distributors for availability and specifications.

DC Electrical Characteristics (Note 2)

DC Supply Voltage (V_{DD})	+ 5 V_{DD} to + 15 V_{DD}
Input Voltage (V_{IN})	0V to V_{DD} V_{DD}

Operating Temperature Range (T _A)	
4051BM/4052BM/4053BM	-55°C to +125°C
4051BC/4052BC/4053BC	-40°C to +85°C

Symbol	Parameter	Conditions	-55°C		+25°			+125°C		Units
			Min	Max	Min	Typ	Max	Min	Max	
I _Q	Quiescent Device Current	V _{DD} = 5V		5			5		150	μA
		V _{DD} = 10V		10			10		300	μA
		V _{DD} = 15V		20			20		600	μA

R_{ON}	"ON" Resistance (Peak for $V_{EE} \leq V_{IS} \leq V_{DD}$)	$R_L = 10\text{ k}\Omega$ (any channel selected)	$V_{DD} = 2.5\text{V}$, $V_{EE} = -2.5\text{V}$ or $V_{DD} = 5\text{V}$, $V_{EE} = 0\text{V}$	800	270	1050	1300	Ω
			$V_{DD} = 5\text{V}$, $V_{EE} = -5\text{V}$ or $V_{DD} = 10\text{V}$, $V_{EE} = 0\text{V}$	310	120	400	550	Ω
			$V_{DD} = 7.5\text{V}$, $V_{EE} = -7.5\text{V}$ or $V_{DD} = 15\text{V}$, $V_{EE} = 0\text{V}$	200	80	240	320	Ω
ΔR_{ON}	Δ "ON" Resistance Between Any Two Channels	$R_L = 10\text{ k}\Omega$ (any channel selected)	$V_{DD} = 2.5\text{V}$, $V_{EE} = -2.5\text{V}$ or $V_{DD} = 5\text{V}$, $V_{EE} = 0\text{V}$		10			Ω
			$V_{DD} = 5\text{V}$, $V_{EE} = -5\text{V}$ or $V_{DD} = 10\text{V}$, $V_{EE} = 0\text{V}$		10			Ω
			$V_{DD} = 7.5\text{V}$, $V_{EE} = -7.5\text{V}$ or $V_{DD} = 15\text{V}$, $V_{EE} = 0\text{V}$		5			Ω
	"OFF" Channel Leakage Current, any channel "OFF"	$V_{DD} = 7.5\text{V}$, $V_{EE} = -7.5\text{V}$ $O/I = \pm 7.5\text{V}$, $I/O = 0\text{V}$		± 50	± 0.01	± 50	± 500	nA
	"OFF" Channel Leakage Current, all channels "OFF" (Common OUT/I/N)	Inhibit = 7.5V $V_{DD} = 7.5\text{V}$, $V_{EE} = -7.5\text{V}$, $O/I = 0\text{V}$, $I/O = \pm 7.5\text{V}$	CD4051	± 200	± 0.08	± 200	± 2000	nA
			CD4052	± 200	± 0.04	± 200	± 2000	nA
			CD4053	± 200	± 0.02	± 200	± 2000	nA

V _{IL}	Low Level Input Voltage	V _{EE} = V _{SS} R _L = 1 k Ω to V _{SS} I _{IS} < 2 μ A on all OFF channels V _{IS} = V _{DD} thru 1 k Ω V _{DD} = 5V V _{DD} = 10V V _{DD} = 15V		1.5 3.0 4.0		1.5 3.0 4.0	1.5 3.0 4.0	V V V
V _{IH}	High Level Input Voltage	V _{DD} = 5 V _{DD} = 10 V _{DD} = 15	3.5 7 11		3.5 7 11		3.5 7 11	V V V

Note 1: "Absolute Maximum Ratings" are those values beyond which the safety of the device cannot be guaranteed. Except for "Operating Temperature Range", they are not meant to imply that the devices should be operated at these limits. The table of "Electrical Characteristics" provides conditions for actual device operation.

Note 2: All voltages measured with respect to V_{EE} unless otherwise specified.

DC Electrical Characteristics (Note 2) (Continued)

Symbol	Parameter	Conditions	-40°C		+25°C			+85°C		Units
			Min	Max	Min	Typ	Max	Min	Max	
I_{IN}	Input Current	$V_{DD} = -15V, V_{EE} = 0V$ $V_{IN} = 0V$ $V_{DD} = -15V, V_{EE} = 0V$ $V_{IN} = -15V$		-0.1 0.1		-10 ⁻⁵ 10 ⁻⁵	-0.1 0.1		-1.0 1.0	μA μA
I_{DD}	Quiescent Device Current	$V_{DD} = 5V$ $V_{DD} = 10V$ $V_{DD} = 15V$		20 40 80			20 40 80		150 300 600	μA μA μA
Signal Inputs (V_{IS}) and Outputs (V_{OS})										
R_{ON}	"ON" Resistance (Peak for $V_{EE} \leq V_{IS} \leq V_{DD}$)	$R_L = 10\text{ k}\Omega$ (any channel selected) $V_{DD} = -2.5V, V_{EE} = -2.5V$ or $V_{DD} = 5V, V_{EE} = 0V$ $V_{DD} = 5V, V_{EE} = -5V$ or $V_{DD} = 10V, V_{EE} = 0V$ $V_{DD} = 7.5V, V_{EE} = -7.5V$ or $V_{DD} = 15V, V_{EE} = 0V$		850 330 210		270 120 80	1050 400 240		1200 520 300	Ω Ω Ω
ΔR_{ON}	Δ "ON" Resistance Between Any Two Channels	$R_L = 10\text{ k}\Omega$ (any channel selected) $V_{DD} = -2.5V, V_{EE} = -2.5V$ or $V_{DD} = 5V, V_{EE} = 0V$ $V_{DD} = 5V, V_{EE} = -5V$ or $V_{DD} = 10V, V_{EE} = 0V$ $V_{DD} = 7.5V, V_{EE} = -7.5V$ or $V_{DD} = 15V, V_{EE} = 0V$				10 10 5				Ω Ω Ω
	"OFF" Channel Leakage Current, any channel "OFF"	$V_{DD} = 7.5V, V_{EE} = -7.5V$ $O/I = +7.5V, I/O = 0V$		± 50		± 0.01	± 50		± 500	nA
	"OFF" Channel Leakage Current, all channels	Inhibit = 7.5V $V_{DD} = 7.5V, V_{EE} = -7.5V, O/I = 0V$		± 200 ± 200		± 0.08 ± 0.04	± 200 ± 200		± 2000 ± 2000	nA nA
	"OFF" (Common OUT/IN)	$I/O = +7.5V$ CD4051 CD4052 CD4053		± 200		± 0.02	± 200		± 2000	nA
Control Inputs A, B, C and Inhibit										
V_{IL}	Low Level Input Voltage	$V_{EE} = V_{SS}, R_L = 1\text{ k}\Omega$ to V_{SS} $I_{IS} < 2\text{ }\mu A$ on all OFF Channels $V_{IS} = V_{DD}$ thru $1\text{ k}\Omega$ $V_{DD} = 5V$ $V_{DD} = 10V$ $V_{DD} = 15V$		1.5 3.0 4.0			1.5 3.0 4.0		1.5 3.0 4.0	V V V
V_{IH}	High Level Input Voltage	$V_{DD} = 5V$ $V_{DD} = 10V$ $V_{DD} = 15V$	3.5 7 11		3.5 7 11			3.5 7 11		V V V
I_{IN}	Input Current	$V_{DD} = -15V, V_{EE} = 0V$ $V_{IN} = 0V$ $V_{DD} = -15V, V_{EE} = 0V$ $V_{IN} = -15V$		-0.1 0.1		-10 ⁻⁵ 10 ⁻⁵	-0.1 0.1		-1.0 1.0	μA μA

Note 1: "Absolute Maximum Ratings" are those values beyond which the safety of the device cannot be guaranteed. Except for "Operating Temperature Range" they are not meant to imply that the devices should be operated at these limits. The table of "Electrical Characteristics" provides conditions for actual device operation.

Note 2: All voltages measured with respect to V_{SS} unless otherwise specified.

ANEXO L. LM78XX

LM78XX Series Voltage Regulators

General Description

The LM78XX series of three terminal regulators is available with several fixed output voltages making them useful in a wide range of applications. One of these is local on card regulation, eliminating the distribution problems associated with single point regulation. The voltages available allow these regulators to be used in logic systems, instrumentation, HiFi, and other solid state electronic equipment. Although designed primarily as fixed voltage regulators these devices can be used with external components to obtain adjustable voltages and currents.

The LM78XX series is available in an aluminum TO-3 package which will allow over 1.0A load current if adequate heat sinking is provided. Current limiting is included to limit the peak output current to a safe value. Safe area protection for the output transistor is provided to limit internal power dissipation. If internal power dissipation becomes too high for the heat sinking provided, the thermal shutdown circuit takes over preventing the IC from overheating.

Considerable effort was expended to make the LM78XX series of regulators easy to use and minimize the number of external components. It is not necessary to bypass the out-

put, although this does improve transient response. Input bypassing is needed only if the regulator is located far from the filter capacitor of the power supply.

For output voltage other than 5V, 12V and 15V the LM117 series provides an output voltage range from 1.2V to 57V.

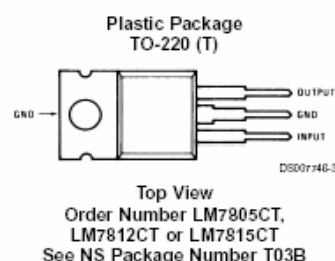
Features

- Output current in excess of 1A
- Internal thermal overload protection
- No external components required
- Output transistor safe area protection
- Internal short circuit current limit
- Available in the aluminum TO-3 package

Voltage Range

LM7805C	5V
LM7812C	12V
LM7815C	15V

Connection Diagrams



Absolute Maximum Ratings (Note 3)

If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office/ Distributors for availability and specifications.

Input Voltage

(V_O = 5V, 12V and 15V)

35V

Internal Power Dissipation (Note 1)

Internally Limited

Operating Temperature Range (T_A)

0°C to +70°C

Maximum Junction Temperature

(K Package)

150°C

(T Package)

150°C

Storage Temperature Range

-65°C to +150°C

Lead Temperature (Soldering, 10 sec.)

TO-3 Package K

300°C

TO-220 Package T

230°C

Electrical Characteristics LM78XXC (Note 2)0°C ≤ T_J ≤ 125°C unless otherwise noted.

Output Voltage				5V			12V			15V			Units
Input Voltage (unless otherwise noted)				10V			19V			23V			
Symbol	Parameter	Conditions		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
V _O	Output Voltage	T _J = 25°C, 5 mA ≤ I _O ≤ 1A		4.8	5	5.2	11.5	12	12.5	14.4	15	15.6	V
		P _D ≤ 15W, 5 mA ≤ I _O ≤ 1A		4.75		5.25	11.4		12.6	14.25		15.75	V
		V _{MIN} ≤ V _{IN} ≤ V _{MAX}		(7.5 ≤ V _{IN} ≤ 20)			(14.5 ≤ V _{IN} ≤ 27)			(17.5 ≤ V _{IN} ≤ 30)			V
ΔV _O	Line Regulation	I _O = 500 mA	T _J = 25°C	3		50	4		120	4		150	mV
			ΔV _{IN}	(7 ≤ V _{IN} ≤ 25)		14.5 ≤ V _{IN} ≤ 30)		(17.5 ≤ V _{IN} ≤ 30)		V			
			0°C ≤ T _J ≤ +125°C	50		120		150		mV			
		ΔV _{IN}	(8 ≤ V _{IN} ≤ 20)		(15 ≤ V _{IN} ≤ 27)		(18.5 ≤ V _{IN} ≤ 30)		V				
		I _O ≤ 1A	T _J = 25°C	50		120		150		mV			
			ΔV _{IN}	(7.5 ≤ V _{IN} ≤ 20)		(14.6 ≤ V _{IN} ≤ 27)		(17.7 ≤ V _{IN} ≤ 30)		V			
ΔV _O	Load Regulation	T _J = 25°C	5 mA ≤ I _O ≤ 1.5A	10		50	12		120	12		150	mV
			250 mA ≤ I _O ≤ 750 mA	25		60		75		mV			
			5 mA ≤ I _O ≤ 1A, 0°C ≤ T _J ≤ +125°C	50		120		150		mV			
		I _O	Quiescent Current	I _O ≤ 1A	T _J = 25°C	8		8		8		mA	
					0°C ≤ T _J ≤ +125°C	8.5		8.5		8.5		mA	
				ΔI _O	Quiescent Current Change	5 mA ≤ I _O ≤ 1A		0.5		0.5		0.5	
T _J = 25°C, I _O ≤ 1A	1.0		1.0			1.0		mA					
V _{MIN} ≤ V _{IN} ≤ V _{MAX}	(7.5 ≤ V _{IN} ≤ 20)		(14.8 ≤ V _{IN} ≤ 27)			(17.9 ≤ V _{IN} ≤ 30)		V					
ΔI _O	Quiescent Current Change	I _O ≤ 500 mA, 0°C ≤ T _J ≤ +125°C		1.0		1.0		1.0		mA			
		V _{MIN} ≤ V _{IN} ≤ V _{MAX}		(7 ≤ V _{IN} ≤ 25)		(14.5 ≤ V _{IN} ≤ 30)		(17.5 ≤ V _{IN} ≤ 30)		V			
V _N	Output Noise Voltage	T _A = 25°C, 10 Hz ≤ f ≤ 100 kHz		40		75		90		μV			
$\frac{\Delta V_{IN}}{\Delta V_{OUT}}$	Ripple Rejection	f = 120 Hz	I _O ≤ 1A, T _J = 25°C or I _O ≤ 500 mA, 0°C ≤ T _J ≤ +125°C	62		80	55		72	54		70	dB
				62		55		54		dB			
			V _{MIN} ≤ V _{IN} ≤ V _{MAX}	(8 ≤ V _{IN} ≤ 18)		(15 ≤ V _{IN} ≤ 25)		(18.5 ≤ V _{IN} ≤ 28.5)		V			
R _O	Dropout Voltage	T _J = 25°C, I _O = 1A		2.0		2.0		2.0		V			
	Output Resistance	f = 1 kHz		8		18		19		mΩ			

Electrical Characteristics LM78XXC (Note 2) (Continued)0°C ≤ T_J ≤ 125°C unless otherwise noted.

Output Voltage			5V			12V			15V			Units
Input Voltage (unless otherwise noted)			10V			19V			23V			
Symbol	Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
	Short-Circuit Current	T _j = 25°C	2.1			1.5			1.2			A
	Peak Output Current	T _j = 25°C	2.4			2.4			2.4			A
	Average TC of V _{OUT}	0°C ≤ T _j ≤ +125°C, I _O = 5 mA	0.6			1.5			1.8			mV/°C
V _{IN}	Input Voltage Required to Maintain Line Regulation	T _j = 25°C, I _O ≤ 1A	7.5			14.6			17.7			V

Note 1: Thermal resistance of the TO-3 package (K, KC) is typically 4°C/W junction to case and 35°C/W case to ambient. Thermal resistance of the TO-220 package (T) is typically 4°C/W junction to case and 50°C/W case to ambient.

Note 2: All characteristics are measured with capacitor across the input of 0.22 µF, and a capacitor across the output of 0.1 µF. All characteristics except noise voltage and ripple rejection ratio are measured using pulse techniques (t_w ≤ 10 ms, duty cycle ≤ 5%). Output voltage changes due to changes in internal temperature must be taken into account separately.

Note 3: Absolute Maximum Ratings indicate limits beyond which damage to the device may occur. For guaranteed specifications and the test conditions, see Electrical Characteristics.

ANEXO M. LM79XX

LM79XX Series 3-Terminal Negative Regulators

General Description

The LM79XX series of 3-terminal regulators is available with fixed output voltages of $-5V$, $-12V$, and $-15V$. These devices need only one external component—a compensation capacitor at the output. The LM79XX series is packaged in the TO-220 power package and is capable of supplying 1.5A of output current.

These regulators employ internal current limiting, safe area protection and thermal shutdown for protection against virtually all overload conditions.

Low ground pin current of the LM79XX series allows output voltage to be easily boosted above the preset value with a

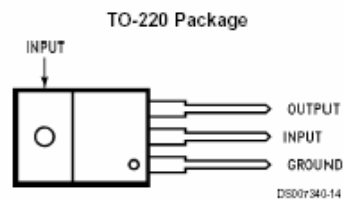
resistor divider. The low quiescent current drain of these devices with a specified maximum change with line and load ensures good regulation in the voltage boosted mode.

For applications requiring other voltages, see LM137 datasheet.

Features

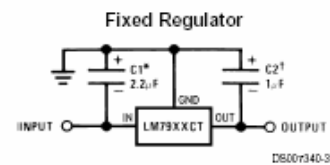
- Thermal, short circuit and safe area protection
- High ripple rejection
- 1.5A output current
- 4% tolerance on preset output voltage

Connection Diagrams



Front View
Order Number LM7905CT, LM7912CT or LM7915CT
See NS Package Number TO3B

Typical Applications



*Required if regulator is separated from filter capacitor by more than 3". For value given, capacitor must be solid tantalum. 25µF aluminum electrolytic may be substituted.

†Required for stability. For value given, capacitor must be solid tantalum. 25µF aluminum electrolytic may be substituted. Values given may be increased without limit.

For output capacitance in excess of 100µF, a high current diode from input to output (1N4001, etc.) will protect the regulator from momentary input shorts.

Absolute Maximum Ratings (Note 1)

If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office/ Distributors for availability and specifications.

Input Voltage

 $(V_O = -5V)$

-25V

 $(V_O = -12V \text{ and } -15V)$

-35V

Input-Output Differential

 $(V_O = -5V)$

25V

 $(V_O = -12V \text{ and } -15V)$

30V

Power Dissipation (Note 2)

Internally Limited

Operating Junction Temperature Range

0°C to +125°C

Storage Temperature Range

-65°C to +150°C

Lead Temperature (Soldering, 10 sec.)

230°C

Electrical Characteristics

Conditions unless otherwise noted: $I_{OUT} = 500\text{mA}$, $C_{IN} = 2.2\mu\text{F}$, $C_{OUT} = 1\mu\text{F}$, $0^\circ\text{C} \leq T_J \leq +125^\circ\text{C}$, Power Dissipation $\leq 1.5\text{W}$.

Part Number			LM7905C			Units
Output Voltage			-5V			
Input Voltage (unless otherwise specified)			-10V			
Symbol	Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	
V _O	Output Voltage	T _J = 25°C	-4.8	-5.0	-5.2	V
		5mA ≤ I _{OUT} ≤ 1A, P ≤ 15W	-4.75		-5.25	V
			(-20 ≤ V _{IN} ≤ -7)			V
ΔV _O	Line Regulation	T _J = 25°C, (Note 3)		8	50	mV
			(-25 ≤ V _{IN} ≤ -7)			V
				2	15	mV
			(-12 ≤ V _{IN} ≤ -8)			V
ΔV _O	Load Regulation	T _J = 25°C, (Note 3) 5mA ≤ I _{OUT} ≤ 1.5A 250mA ≤ I _{OUT} ≤ 750mA		15	100	mV
				5	50	mV
I _Q	Quiescent Current	T _J = 25°C		1	2	mA
ΔI _Q	Quiescent Current Change	With Line			0.5	mA
			(-25 ≤ V _{IN} ≤ -7)			V
		With Load, 5mA ≤ I _{OUT} ≤ 1A			0.5	mA
V _n	Output Noise Voltage	T _A = 25°C, 10Hz ≤ f ≤ 100Hz		125		μV
	Ripple Rejection	f = 120Hz	54	66		dB
				(-18 ≤ V _{IN} ≤ -8)		V
	Dropout Voltage	T _J = 25°C, I _{OUT} = 1A		1.1		V
I _O MAX	Peak Output Current	T _J = 25°C		2.2		A
	Average Temperature Coefficient of Output Voltage	I _{OUT} = 5mA, 0°C ≤ T _J ≤ 100°C		0.4		mV/°C

Electrical Characteristics

Conditions unless otherwise noted: $I_{OUT} = 500\text{mA}$, $C_{IN} = 2.2\mu\text{F}$, $C_{OUT} = 1\mu\text{F}$, $0^\circ\text{C} \leq T_J \leq +125^\circ\text{C}$, Power Dissipation $\leq 1.5\text{W}$.

Part Number			LM7912C			LM7915C			Units
Output Voltage			-12V			-15V			
Input Voltage (unless otherwise specified)			-19V			-23V			
Symbol	Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
V _O	Output Voltage	T _J = 25°C	-11.5	-12.0	-12.5	-14.4	-15.0	-15.6	V
		5mA ≤ I _{OUT} ≤ 1A, P ≤ 15W	-11.4		-12.6	-14.25		-15.75	V
			(-27 ≤ V _{IN} ≤ -14.5)			(-30 ≤ V _{IN} ≤ -17.5)			V
ΔV _O	Line Regulation	T _J = 25°C, (Note 3)		5	80		5	100	mV
			(-30 ≤ V _{IN} ≤ -14.5)			(-30 ≤ V _{IN} ≤ -17.5)		V	
				3	30		3	50	mV
			(-22 ≤ V _{IN} ≤ -16)			(-26 ≤ V _{IN} ≤ -20)		V	
ΔV _O	Load Regulation	T _J = 25°C, (Note 3)							

Electrical Characteristics (Continued)Conditions unless otherwise noted: $I_{OUT} = 500\text{mA}$, $C_{IN} = 2.2\mu\text{F}$, $C_{OUT} = 1\mu\text{F}$, $0^\circ\text{C} \leq T_J \leq +125^\circ\text{C}$, Power Dissipation $\leq 1.5\text{W}$.

Part Number			LM7912C			LM7915C			Units
Output Voltage			-12V			-15V			
Input Voltage (unless otherwise specified)			-19V			-23V			
Symbol	Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
		$5\text{mA} \leq I_{\text{OUT}} \leq 1.5\text{A}$		15	200		15	200	mV
		$250\text{mA} \leq I_{\text{OUT}} \leq 750\text{mA}$		5	75		5	75	mV
I_Q	Quiescent Current	$T_J = 25^\circ\text{C}$		1.5	3		1.5	3	mA
ΔI_Q	Quiescent Current Change	With Line			0.5			0.5	mA
			$(-30 \leq V_{\text{IN}} \leq -14.5)$		$(-30 \leq V_{\text{IN}} \leq -17.5)$			V	
		With Load, $5\text{mA} \leq I_{\text{OUT}} \leq 1\text{A}$			0.5			0.5	mA
V_n	Output Noise Voltage	$T_A = 25^\circ\text{C}$, $10\text{Hz} \leq f \leq 100\text{Hz}$		300			375		μV
	Ripple Rejection	$f = 120\text{Hz}$	54	70		54	70		dB
				$(-25 \leq V_{\text{IN}} \leq -15)$			$(-30 \leq V_{\text{IN}} \leq -17.5)$		V
	Dropout Voltage	$T_J = 25^\circ\text{C}$, $I_{\text{OUT}} = 1\text{A}$		1.1			1.1		V
I_{OMAX}	Peak Output Current	$T_J = 25^\circ\text{C}$		2.2			2.2		A
	Average Temperature Coefficient of Output Voltage	$I_{\text{OUT}} = 5\text{mA}$, $0^\circ\text{C} \leq T_J \leq 100^\circ\text{C}$		-0.8			-1.0		mV/°C

Note 1: Absolute Maximum Ratings indicate limits beyond which damage to the device may occur. Operating Ratings indicate conditions for which the device is intended to be functional, but do not guarantee specific performance limits. For guaranteed specifications and test conditions, see the Electrical Characteristics.

Note 2: Refer to Typical Performance Characteristics and Design Considerations for details.

Note 3: Regulation is measured at a constant junction temperature by pulse testing with a low duty cycle. Changes in output voltage due to heating effects must be taken into account.

Design Considerations

The LM79XX fixed voltage regulator series has thermal overload protection from excessive power dissipation, internal short circuit protection which limits the circuit's maximum current, and output transistor safe-area compensation for reducing the output current as the voltage across the pass transistor is increased.

Although the internal power dissipation is limited, the junction temperature must be kept below the maximum specified temperature (125°C) in order to meet data sheet specifications. To calculate the maximum junction temperature or heat sink required, the following thermal resistance values should be used:

θ_{JA} = Junction-to-Ambient Thermal Resistance
 θ_{JC} = Junction-to-Case Thermal Resistance
 θ_{CA} = Case-to-Ambient Thermal Resistance
 θ_{CS} = Case-to-Heat Sink Thermal Resistance
 θ_{SA} = Heat Sink-to-Ambient Thermal Resistance

Package	Typ θ_{JC} $^\circ\text{C}/\text{W}$	Max θ_{JC} $^\circ\text{C}/\text{W}$	Typ θ_{JA} $^\circ\text{C}/\text{W}$	Max θ_{JA} $^\circ\text{C}/\text{W}$
TO-220	3.0	5.0	60	40

$$P_{D\text{ MAX}} = \frac{T_{J\text{ MAX}} - T_A}{\theta_{JC} + \theta_{CA}} \text{ or } \frac{T_{J\text{ MAX}} - T_A}{\theta_{JA}}$$

$$\theta_{CA} = \theta_{CS} + \theta_{SA} \text{ (without heat sink)}$$

Solving for T_J :

$$T_J = T_A + P_D (\theta_{JC} + \theta_{CA}) \text{ or } \\ = T_A + P_D \theta_{JA} \text{ (without heat sink)}$$

Where:

T_J = Junction Temperature
 T_A = Ambient Temperature
 P_D = Power Dissipation

ANEXO N. Normas ASTM

Denominación: G3 - 89 (Reaprobada en 1994)

Práctica estándar para las convenciones aplicables a medidas electroquímicas en pruebas de corrosión

Esta norma es emitida bajo la designación G 3, el número siguiente a la designación indica el año de adopción original o, en el caso de revisión, el año de la última revisión. Un número entre paréntesis indica el año de la última reaprobación. Un superíndice épsilon (ϵ) indica un cambio de editorial desde la última revisión o reaprobación.

1. Alcance

1.1 Esta practica está destinada a proporcionar las convenciones para el reporte y representación de los datos de corrosión electroquímica. Son incluidas las convenciones para potencial, densidad de corriente, impedancia y admitancia electroquímica, y las convenciones para la presentación gráfica de tales datos.

1.2 *Esta norma no pretende abordar todo lo concerniente a la seguridad asociada con su uso. Es responsabilidad del usuario establecer las medidas de seguridad e higiene adecuadas y determinar con anterioridad la aplicabilidad de las limitaciones reguladoras a utilizar.*

2. Documentos de referencia

2.1 Normas ASTM:

E 380 Práctica para el uso del Sistema Internacional de Unidades (SI)(Sistema Métrico Modernizado)

3. Importancia y uso

3.1 Esta práctica proporciona una orientación para el reporte, presentación y trazado de los datos de corrosión electroquímica e incluye recomendaciones sobre los signos y las convenciones. El uso de esta práctica tendrá como resultado el reporte de datos de corrosión electroquímica en un formato estándar, facilitando la comparación entre los datos desarrollados en diferentes laboratorios o en diferentes periodos. Las recomendaciones expuestas en esta norma pueden ser utilizadas para el registro y reporte de los datos de corrosión obtenidos de pruebas electroquímicas tales como, polarización potencioestática y potenciodinámica, resistencia de polarización, medidas de impedancia y admitancia electroquímica, corrosión galvánica y medida del potencial de circuito abierto.

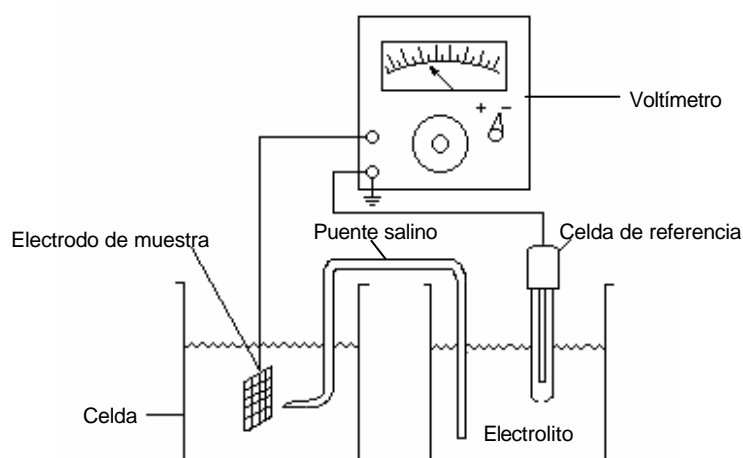
4. Convención de signos para el potencial de electrodo

4.1 Se recomienda usar la convención de signos invariables de Estocolmo en el reporte de los resultados de las mediciones del potencial de la muestra en las pruebas de corrosión. En esta convención la dirección positiva del potencial de electrodo implica un incremento en la condición de oxidación del electrodo en cuestión. La dirección positiva también ha sido denotada como dirección noble porque los potenciales de corrosión de la mayoría de los metales nobles, tales como el oro, son más positivos que los de los metales base no pasivos. Por otro lado, la dirección negativa, llamada dirección activa, está asociada con la reducción y por lo tanto con los potenciales de corrosión de los metales activos, tales como el magnesio. Esta convención fue adoptada unánimemente en 1.953 como el estándar para el potencial de electrodo por la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada.

4.2 En el caso de un electrodo de muestra de potencial desconocido en un electrolito acuoso, con un electrodo de referencia conectado al terminal de tierra de un voltímetro, considere el circuito mostrado en la figura 1. Si el voltímetro lee en la escala, cuando el interruptor de polaridad es negativo, el potencial del electrodo de muestra es negativo (con respecto al electrodo de referencia). Contrariamente, si el voltímetro lee en la escala cuando la polaridad es positiva, el potencial de la muestra es positivo. Por otro lado, si el electrodo de muestra está conectado al terminal de tierra, el potencial será positivo si el medidor está en la escala cuando el interruptor de polaridad es negativo, y viceversa.

Nota 1: en casos donde la polaridad de un instrumento de medida está en duda, una prueba de verificación simple puede ser realizada de la siguiente forma: conecte el instrumento de medida a una pila seca con el cable del electrodo de referencia al terminal negativo de la batería y el cable del electrodo de muestra en el terminal positivo. Ajuste el interruptor de rango para acomodar el voltaje de la pila. La deflexión del medidor mostrará la dirección del potencial positivo.

También, el potencial de corrosión del magnesio o del zinc deberá ser negativo en una solución de 1N NaCl si es medido contra un electrodo de calomel saturado estándar (SCE).



Nota - El potencial de electrodo de la muestra es negativo.

Figura 1. Diagrama esquemático de un equipo que mide el potencial de

5. Convención de signos para los coeficientes de temperatura del potencial de electrodo

5.1 Hay dos tipos de coeficientes de temperatura del potencial de electrodo: coeficientes de temperatura isotérmicos y coeficientes de temperatura térmicos. La convención de signos recomendada para ambos tipos de coeficientes de temperatura es que el coeficiente de temperatura es positivo cuando un incremento en la temperatura produce un incremento en el potencial de electrodo (se hace más positivo). Asimismo, el segundo coeficiente de temperatura es positivo cuando un incremento en la temperatura produce un incremento en el primer coeficiente de temperatura (se hace más positivo).

6. Convención de signos para la corriente y la densidad de corriente

6.1 Es recomendada la convención de signos en la cual las corrientes y densidades de corriente anódicas son consideradas positivas, y las corrientes y densidades de corriente catódicas son negativas. Cuando el potencial es trazado contra el logaritmo de la densidad de corriente, solamente los valores absolutos de la densidad de corriente pueden ser graficados. En tales gráficas, los valores catódicos deberán ser claramente diferenciados de los valores anódicos, si ambos están presentes.

7. Convención para mostrar los datos de polarización

7.1 *Convención de signos:* la práctica matemática estándar para el trazado de graficas es recomendada para mostrar los datos de corrosión electroquímica. En esta práctica, los valores positivos son graficados por encima del origen en el eje

de la ordenada y a la derecha del origen en el eje de la abscisa. En las gráficas logarítmicas, el valor de la abscisa se incrementa de izquierda a derecha y el valor de la ordenada se incrementa de abajo hacia arriba.

7.2 Gráficas de densidad de corriente - potencial: es recomendada una convención uniforme para graficar datos de densidad de corriente - potencial, es decir, grafique la densidad de corriente a lo largo de la abscisa y el potencial a lo largo de la ordenada. En las gráficas de densidad de corriente - potencial, la densidad de corriente puede ser trazada en un eje lineal o logarítmico. En general, las gráficas logarítmicas son mas indicadas para la incorporación de amplios rangos de datos de densidad de corriente, y para la demostración de las relaciones de Tafel. Las gráficas lineales son recomendadas para estudios en los cuales el rango de densidad de corriente o potencial es pequeño, o en casos donde es importante la región en la cual la densidad de corriente cambia de anódica a catódica. Las gráficas lineales también son usadas para la determinación de la resistencia de polarización R_p , la cual está definida como la pendiente de la gráfica de potencial – densidad de corriente en el potencial de corrosión E_{corr} . La relación entre la resistencia de polarización R_p y la densidad de corriente de corrosión i_{corr} es:

$$\left[\frac{d(\Delta E)}{di} \right]_{\Delta E=0} = R_p = \frac{b_a b_c}{2.303(b_a + b_c) i_{corr}}$$

donde:

b_a = pendiente de Tafel anódica,

b_c = pendiente de Tafel catódica, y

ΔE = diferencia $E - E_{corr}$, donde E es el potencial de la muestra.

La figura 2 es una gráfica de polarización, $E - E_{corr}$, contra la densidad de corriente i (línea sólida), desde la cual la resistencia de polarización R_p ha sido determinada como la pendiente de la curva en el potencial de corrosión E_{corr} .

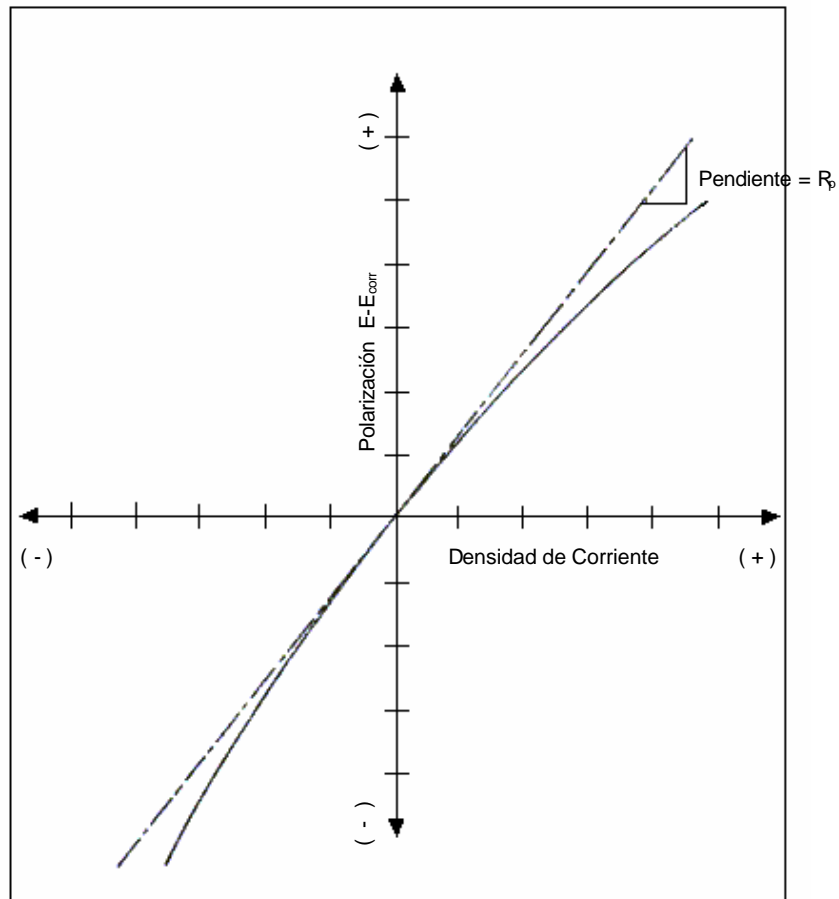


Figura 2 Gráfica ideal de polarización lineal

7.3 Puntos de referencia del potencial: en gráficas donde los potenciales de electrodo son mostrados, es recomendada una indicación de la conversión de los valores presentados para la escala del electrodo de hidrógeno estándar (SHE) y la escala del electrodo de calomel saturado estándar (SCE) si son conocidas. Por

ejemplo, cuando el potencial de electrodo es graficado en la ordenada, entonces la escala SCE podría ser mostrada en el extremo izquierdo de la gráfica y la escala SHE mostrada en el extremo derecho. Una alternativa, en casos donde el electrodo de referencia no es SCE o SHE, sería mostrar sobre el eje de potencial los potenciales de estos electrodos contra la referencia usada. En casos donde estos puntos no son mostrados sobre la gráfica, una conversión algebraica podría ser indicada. Por ejemplo, en el caso de un electrodo de referencia de plata – cloruro de plata (1 M KCl), la conversión podría ser mostrada en el título de la gráfica como:

$$SCE = E - 0.006 \text{ V}$$

$$SHE = E + 0.235 \text{ V}$$

donde E representa el potencial de electrodo medido contra el estándar de plata – cloruro de plata (1 M KCl).

Nota 2: una tabla de potenciales para varios electrodos de referencia comunes es presentada en el apéndice X2.

7.4 Unidades: la unidad de potencial recomendada es el voltio. En casos donde solamente son cubiertos rangos de potencial pequeños, pueden ser usados los milivoltios o microvoltios. Las unidades SI para la densidad de corriente son el amperio por metro cuadrado o miliamperio por centímetro cuadrado (practica E 380). Todavía están en uso unidades expresadas en amperio por centímetro cuadrado o microamperio por centímetro cuadrado.

7.5 Curvas de polarización de muestra: las curvas de polarización de muestra que emplean estas practicas recomendadas son mostradas en las figuras 2 a 6. Las figuras 3 y 4 son curvas ideales que muestran el comportamiento del ánodo activo y activo – pasivo, respectivamente. Las figuras 5 y 6 son datos reales de

polarización para el acero inoxidable Tipo 430 (UNS 43000) y para dos muestras de aluminio. Las figuras 3 y 4 son exhibidas para ilustrar gráficamente la ubicación de varios puntos usados en la discusión de los métodos electroquímicos de pruebas de corrosión. El propósito de las figuras 5 y 6 es mostrar cómo el comportamiento de varios tipos de electrodos puede ser graficado conforme a las convenciones propuestas.

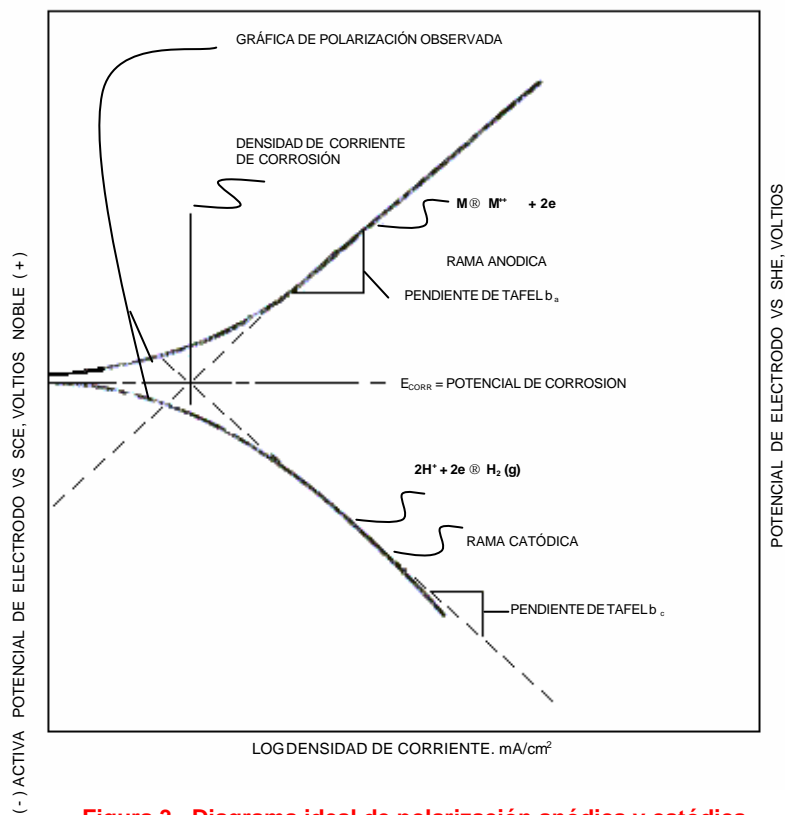


Figura 3. Diagrama ideal de polarización anódica y catódica

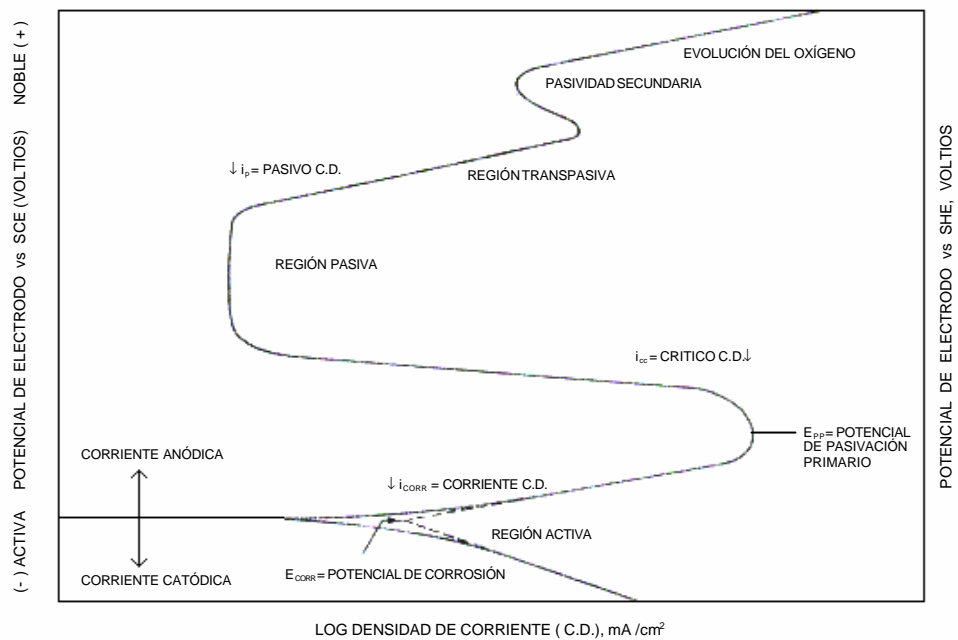


Figura 4. Gráficas ideales de polarización anódica y catódica para un ánodo pasivo

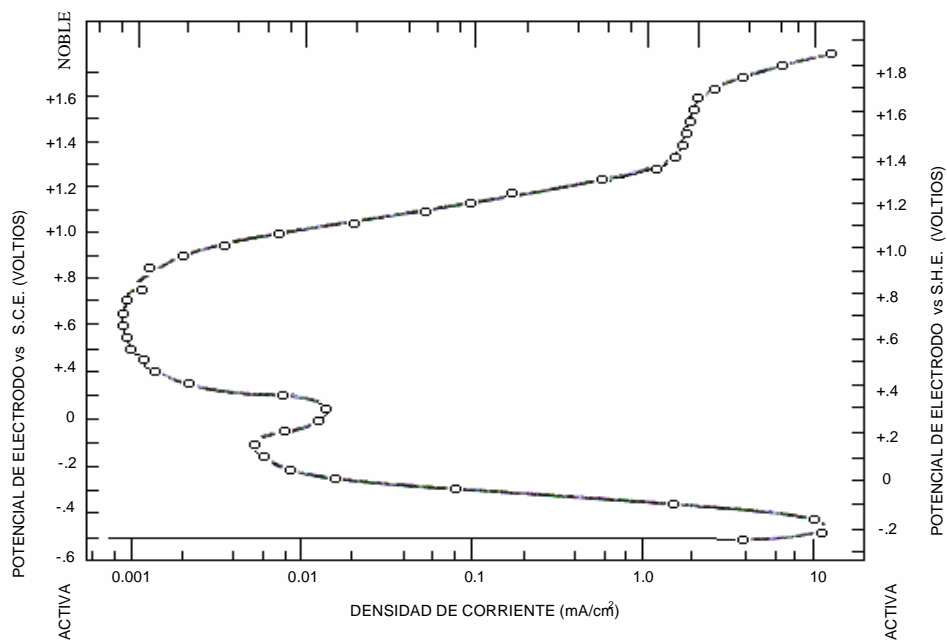


Figura 5. Gráfica típica de polarización anódica potencioestática para

el acero inoxidable tipo 304 en 1.0 M H₂SO₄

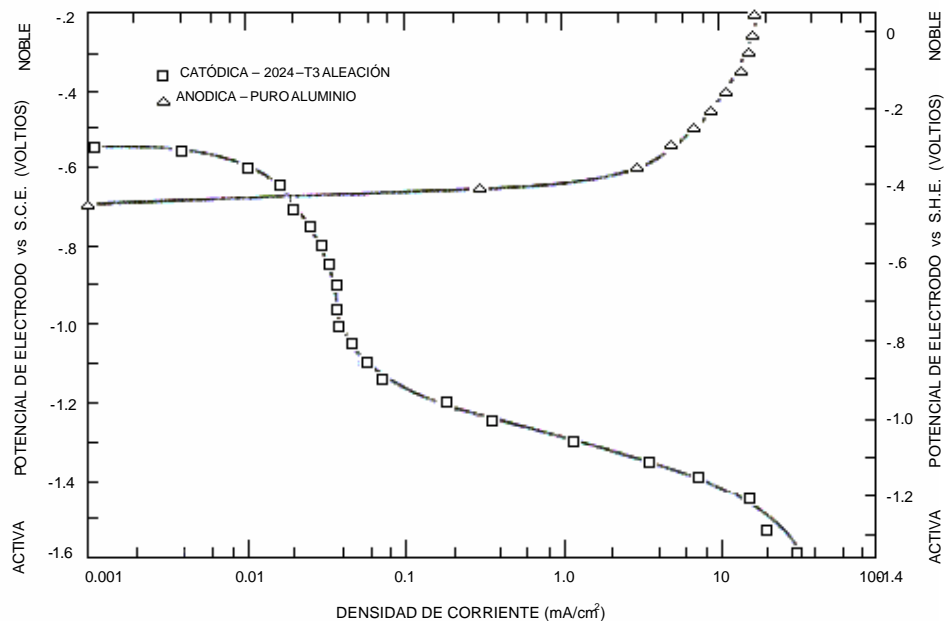


Figura 6. Gráficas típicas de polarización para materiales de aluminio en una solución de 0.2 N NaCl

8. Convenciones para mostrar los datos de impedancia electroquímica

8.1 Tres formatos gráficos comunes usados para el reporte de datos de impedancia electroquímica son los formatos de Nyquist, Bode y de Admitancia. Estos formatos son discutidos para un sistema de electrodo simple modelado por un circuito eléctrico equivalente mostrado en la figura 7. En la convención utilizada la impedancia está definida como:

$$Z = Z' + jZ''$$

donde:

Z = componente real o en fase de la impedancia,

Z'' = componente imaginaria o fuera de fase de la impedancia, y

$$j^2 = -1$$

La magnitud o módulo de la impedancia está definida por $|Z|^2 = (Z')^2 + (Z'')$. Para el circuito eléctrico equivalente mostrado en la figura 7, la componente imaginaria de la impedancia es:

$$Z'' = \frac{-1}{2\pi f C}$$

donde:

f = frecuencia en ciclos por segundo (o hertz, Hz, donde 1Hz es igual a 2π radianes/s, y $\omega = 2\pi f$, donde las unidades para ω son radianes/s), y

C = capacitancia en faradios.

El ángulo de fase, θ está definido como:

$$\theta = \arctan\left(\frac{Z''}{Z'}\right)$$

la admitancia, Y está definida como:

$$\frac{1}{Z} = Y = Y' + jY''$$

donde:

Y' = componente real o en fase de la admitancia, y

Y'' = componente imaginaria o fuera de fase de la admitancia.

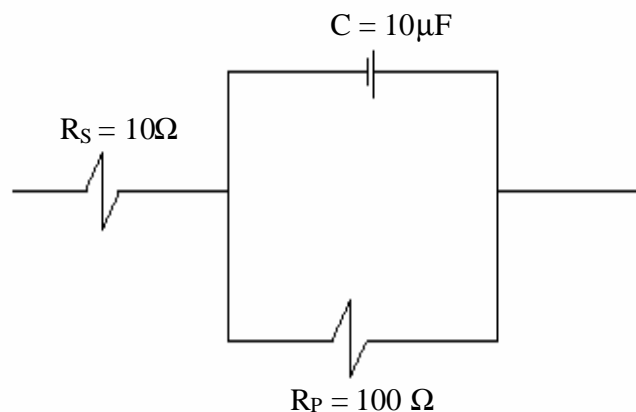


Figura 7. Modelo del circuito eléctrico equivalente para un electrodo simple corroyéndose.

8.2 Formato de Nyquist (plano complejo o Cole-Cole):

8.2.1 La componente real de la impedancia es graficada en la abscisa y la negativa de la componente imaginaria en la ordenada. En esta práctica los valores positivos de la componente real de la impedancia son graficados a la derecha del origen y paralelo al eje x (abscisa). Los valores negativos de la componente imaginaria de la impedancia son trazados verticalmente desde el origen y paralelo al eje y (ordenada).

8.2.2 La figura 8 muestra una gráfica de Nyquist para el circuito equivalente de la figura 7. La dependencia de la frecuencia de los datos no es mostrada explícitamente en este tipo de gráfica. Sin embargo, la frecuencia correspondiente a los puntos de datos seleccionados puede ser directamente anotada en la gráfica de Nyquist. La magnitud de las componentes de impedancia apropiadas se incrementa cuando se alejan del origen de los correspondientes ejes. Los puntos de datos de alta frecuencia son típicamente ubicados hacia el origen de la gráfica mientras que los puntos de baja frecuencia corresponden al incremento en magnitud de las componentes de la impedancia.

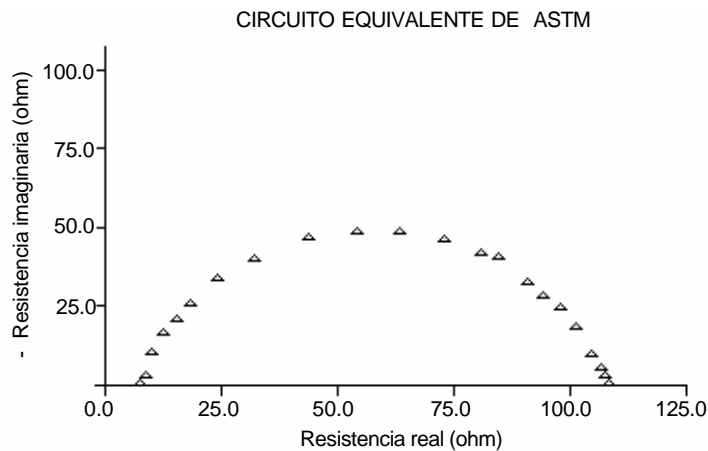


Figura 8 Gráfica de Nyquist para el circuito equivalente de la figura 7

8.2.3 Las unidades recomendadas para ambos ejes son $\text{ohm} \cdot \text{cm}^2$. Las unidades $\text{ohm} \cdot \text{cm}^2$ son obtenidas al multiplicar la resistencia o impedancia medida por el área expuesta de la muestra. Para un resistor y capacitor, o para el circuito equivalente de una celda, el área asumida es de 1 cm^2 . En cuanto a los datos de impedancia mostrados en la figura 8 para el circuito de la figura 7, la distancia desde el origen al primer intercepto (frecuencia alta) con la abscisa corresponde a R_s . La distancia entre el primer intercepto y el segundo intercepto (frecuencia baja) con la abscisa corresponde a R_p .

8.3 Formato de Bode:

8.3.1 Los datos de impedancia electroquímica pueden ser reportados como dos tipos de gráficas de Bode. En el primer caso, el logaritmo de base diez de la magnitud o módulo de la impedancia, $|Z|$, es trazado en la ordenada y el logaritmo de base diez de la frecuencia es trazado en la abscisa. En esta práctica los valores de la frecuencia que aumentan son trazados a la derecha del origen y paralelo al eje x (abscisa) y los valores de magnitud de la impedancia que se incrementan son graficados verticalmente desde el origen y paralelo al eje y .

(ordenada). El origen es seleccionado a valores fuera del cero apropiados de la magnitud de la impedancia y la frecuencia.

8.3.2 La figura 9 muestra una gráfica típica para el modelo del circuito eléctrico simple de la figura 7. La magnitud de la impedancia de alta frecuencia, donde la magnitud de la impedancia es independiente a la frecuencia, corresponde a R_s . La diferencia en magnitud entre la frecuencia baja y la frecuencia alta en las regiones independientes de la frecuencia de la magnitud de la impedancia corresponde a R_p . Estas resistencias son idénticas a las del formato gráfico de Nyquist mostrado en la figura 8.

8.3.3 En el segundo tipo de gráfica de Bode, el negativo del ángulo de fase, $-q$, es trazado en la ordenada y el logaritmo de base diez de la frecuencia es trazado en la abscisa. En esta práctica el aumento de los valores del negativo del ángulo de fase es trazado en la dirección vertical desde el origen a lo largo del eje y (ordenada). En este formato, un comportamiento capacitivo puro es graficado como un valor positivo de 90° . La figura 10 muestra una gráfica típica para el modelo de electrodo simple mostrado en la figura 7.

8.3.4 Las unidades para la frecuencia en ambas gráficas son hertz (ciclos por segundo) o radianes por segundo (radianes por segundo = 2π radianes por ciclo multiplicado por el número de ciclos por segundo). Las unidades de la magnitud de la impedancia son $\text{ohm} \cdot \text{cm}^2$. Las unidades $\text{ohm} \cdot \text{cm}^2$ son obtenidas multiplicando la resistencia o impedancia medida por el área expuesta de la muestra. Las unidades del ángulo de fase son los grados.

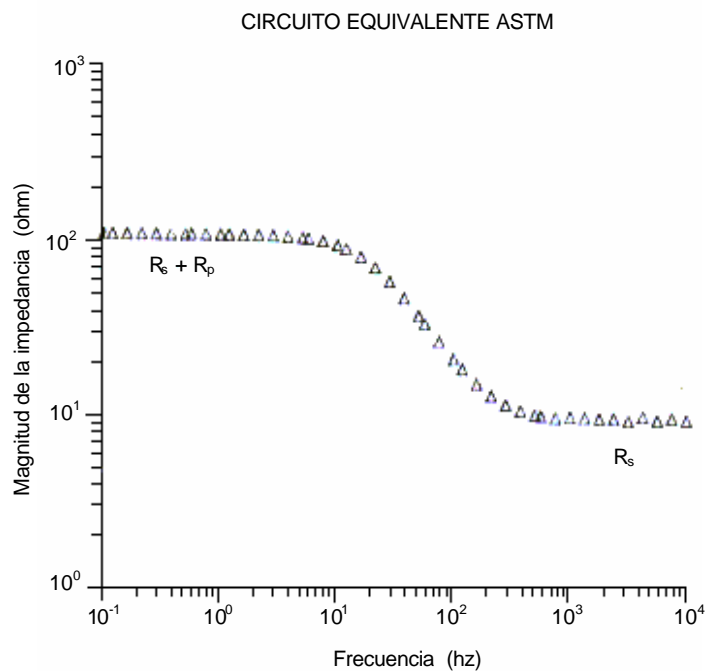


Figura 9. Gráfica típica para el modelo eléctrico simple de la figura 7

8.4 *Formato de Admitancia (plano complejo)*: la componente real de la admitancia es trazada en la abscisa y la componente imaginaria en la ordenada. En esta práctica los valores positivos de la componente real de admitancia son trazados a la derecha del origen y paralelo al eje x (abscisa). Los valores de la componente imaginaria de la impedancia son trazados verticalmente desde el origen y paralelo al eje y (ordenada). Las unidades recomendadas para ambos ejes son $\text{ohm}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$. Las unidades de $\text{ohm}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ son obtenidas dividiendo la admitancia medida (ohm^{-1}) por el área expuesta de la muestra. La dependencia de la frecuencia de los datos no es mostrada explícitamente en este tipo de gráfica. Las magnitudes de las componentes de la admitancia apropiadas aumentan cuando se alejan del origen de los ejes correspondientes.

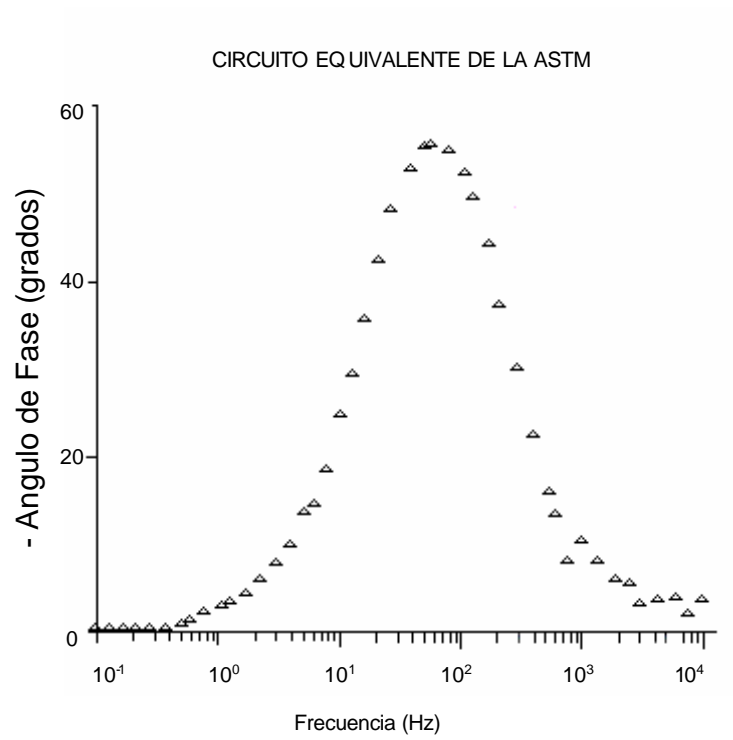


Figura 10. Gráfica típica para el modelo de electrodo simple mostrado en la figura 7

APÉNDICE

X1. INFORMACIÓN SOBRE OTRAS CONVENCIONES

X1.1 Comparación de las convenciones Gibbs-Ostwald y Nernst-Latimer

X1.1.1 Otra convención de signos, la de Nernst-Latimer, ha sido muy utilizada extensamente por físicos y analistas químicos en la descripción de reacciones electroquímicas. Esta convención está basada en la relación:

$$\Delta G = -nFE^* \quad (1)$$

donde:

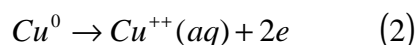
ΔG = cambio de la energía libre de Gibbs,

n = número de cargas por átomo,

F = equivalente electroquímico en faradios, y

E^* = potencial de acuerdo a la convención Nernst-Latimer.

Una consecuencia de esta convención es que el signo del potencial depende de la forma en que esta escrita la reacción. Por ejemplo, la disolución anódica del cobre puede ser expresada como:



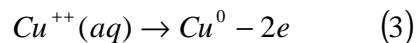
donde:

Cu^0 = cobre metálico, cristalino, unidad actividad,

$Cu^{++}(aq)$ = concentración de iones de cobre en la solución acuosa, y

e = una unidad de carga negativa (un electrón)

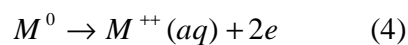
mientras que el platinado de cobre puede ser escrito como:



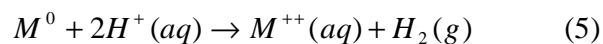
En estos dos casos, el potencial tendría signos opuestos, sin embargo ambas reacciones ocurren simultáneamente sobre la muestra. Las tablas de potenciales para la oxidación de varios metales con respecto al potencial de hidrógeno estándar han tenido amplia circulación. Estos valores han sido llamados “potenciales de oxidación” para denotar el uso de la convención Nernst – Latimer. De este modo, el término “potencial de electrodo” implica el uso de la convención Gibbs – Stockholm.

X1.2 Consecuencias de la convención Gibbs – Stockholm

X1.2.1 Para explorar las consecuencias de la convención Gibbs – Stockholm, considere la corrosión de una superficie metálica:



La reacción en la celda con un electrodo de referencia de hidrógeno sería:



donde:

$H_2(g)$ = hidrógeno en estado gaseoso.

El cambio en la energía libre de Gibbs estaría dado por la expresión:

$$\Delta G = +nFE \quad (6)$$

donde:

E = potencial de electrodo medido de la ecuación 4.

Si este potencial de electrodo fue negativo, entonces la superficie metálica sería activa y la reacción tendería a ocurrir espontáneamente porque la energía libre es negativa.

X1.2.2 Considere el efecto del incremento de la concentración de iones metálicos en la solución de la ecuación 4. El potencial de electrodo de equilibrio de la superficie metálica se haría más noble de acuerdo a la relación:

$$\Delta E = +\left(\frac{RT}{nF}\right) \ln(a_2/a_1) \quad (7)$$

donde:

a_2 = actividad del ión metálico de la solución más concentrada,

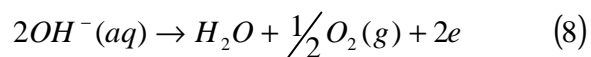
a_1 = actividad del ión metálico de la solución menos concentrada,

R = constante apropiada de la ley de los gases, y

ΔE = potencial de electrodo en la solución concentrada menos el potencial de electrodo en la solución diluida.

De este modo, los aumentos en la actividad de las muestras oxidadas, por ejemplo, $M^{++}(aq)$, tienden a incrementar el potencial de electrodo. Por otro lado, un

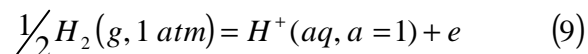
incremento en la actividad de una especie reducida disminuirá el potencial de electrodo. Por ejemplo, considere la reacción de media celda:



Incrementando la concentración del ión hidroxilo se reducirá el potencial de electrodo de esta reacción.

X1.3 Coeficientes de temperatura del potencial de electrodo

X1.3.1 Hay dos tipos de coeficientes de temperatura para las reacciones electroquímicas. El coeficiente de temperatura isotérmico está basado en la definición de la reacción del media celda:



donde:

$\frac{1}{2}H_2(g, 1 \text{ atm})$ = gas hidrógeno a una atmósfera de presión, y

$H^{+}(aq, a = 1)$ = ión de hidrógeno en una solución acuosa a una unidad de actividad.

tiene un potencial de electrodo cero a cualquier temperatura.

X1.3.1.1 De este modo, este coeficiente de temperatura esta dado por el cambio en el potencial de una celda compuesta por el electrodo de muestra y una media celda de hidrógeno estándar. Más formalmente, este primer coeficiente de temperatura está dado por:

$$(dE/dT)_{iso} = \Delta S n F \quad (10)$$

donde:

$(dE/dT)_{iso}$ = coeficiente de temperatura isotérmico del potencial de electrodo,

T = temperatura absoluta, y

ΔS = cambio en la entropía para la reacción de celda total.

X1.3.1.2 Por lo tanto, un incremento en el potencial de electrodo con aumento en la temperatura tiene como resultado un coeficiente de temperatura positivo y significa un aumento en la entropía de la reacción general incluyendo la media celda de referencia.

X1.3.2 El coeficiente de temperatura térmico está definido por una media celda metal-ión metálico a la temperatura de prueba conectada a una media celda igual a la temperatura de referencia. Estas celdas son complicadas por el efecto de difusión térmica y no son reversibles completamente (efecto Soret). En general, si la difusión térmica es prevenida, el coeficiente de temperatura térmico está relacionado con el coeficiente de temperatura isotérmico por un valor constante el cual representa el cambio de la entropía en el electrodo de referencia. De este modo, para un electrodo de hidrógeno estándar:

$$(dE/dT)_{iso} = (dE/dT)_{th} - 0.871 \quad (11)$$

donde:

$(dE/dT)_{th}$ = coeficiente de temperatura térmico del potencial de electrodo, cuando los coeficientes de temperatura están expresados en mV/grado centígrado.

X1.3.3 El segundo coeficiente de temperatura está dado por la segunda derivada de la temperatura y está relacionado con el DC_p , la suma de las capacidades de calor de los productos menos las capacidades de calor de los reactantes por la expresión:

$$dE^2/dT^2 = \Delta C_p / nFT \quad (12)$$

De este modo, el segundo coeficiente de temperatura es positivo cuando el primer coeficiente de temperatura correspondiente aumenta con un incremento en la temperatura.

X2. POTENCIALES DE REFERENCIA ESTÁNDAR Y TABLA DE CONVERSIÓN

TABLA X2.1 Potenciales de referencia y factores de conversión

Electrodo	Potencial (V)	para 25°C	Coeficiente de
			Temperatura Térmico ^A (mV/°C)
(Pt)/H ₂ (α=1)/H ⁺ (α=1)(SHE)	0.000	...	+0.87
Ag / AgCl / 1MKCl	+0.235	...	+0.25

Ag / AgCl / 0.6MCl ⁻	+0.25
Ag / AgCl / 0.1 MCl ⁻	+0.288	...	+0.22
Hg / Hg ₂ Cl ₂ / sat KCl (SCE)	+0.241	+0.244	+0.22
Hg / Hg ₂ Cl ₂ / 1 MKCl	+0.280	+0.283	+0.59
Hg / Hg ₂ Cl ₂ / 0.1 M KCl	+0.334	+0.336	+0.79
Cu / CuSO ₄ sat	+0.30	...	+0.90
Hg / HgSO ₄ / H ₂ SO ₄ ^D	+0.616

^A Para convertir de coeficiente de temperatura térmico a isotérmico, restar 0.87 mV/°C. Así el coeficiente de temperatura isotérmico para Ag-AgCl es -0.62 mV/°C.

^B E' es el potencial estándar para la media celda corregida para la concentración de los iones.

^C E'' también incluye los potenciales de los líquidos para un puente salino saturado de KCl. Para convertir de una escala a otra, sumar el valor indicado.

^D El potencial proporcionado es para un rango de molalidades de H₂SO₄ como es discutido en la R ef.

De (E')	A la escala SHE	A la escala SCE (E')
H ₂ /H ⁺	...	-0.241
Ag / AgCl / 1M KCl	+0.235	-0.006
Ag / AgCl / 0.6M Cl ⁻	+0.25	+0.009
Ag / AgCl / 0.1 M Cl ⁻	+0.288	+0.047
Hg / Hg ₂ Cl ₂ / sat KCl (SCE)	+0.241	...
Hg / Hg ₂ Cl ₂ / 1 M	+0.280	+0.039
Hg / Hg ₂ Cl ₂ / 0.1 M	+0.334	+0.093
Cu / CuSO ₄ sat	+0.30	+0.06
Hg / HgSO ₄ / H ₂ SO ₄	+0.616	...

Denominación: G5 - 94 (Reaprobada en 1999)

Método de prueba de referencia estándar para la realización de mediciones de polarización anódica potencioestáticas y potenciodinámicas

Esta norma es emitida bajo la denominación G 5, el número siguiente a la denominación indica el año de adopción original o, en el caso de revisión, el año de la última revisión. Un número entre paréntesis indica el año de la última reaprobación. Un superíndice epsilon (ϵ) indica un cambio de editorial desde la última revisión o reaprobación.

1. Alcance

1.1 Este método de prueba describe un procedimiento experimental para la revisión de técnicas experimentales e instrumentación. Si es seguido, este método de prueba proporcionará medidas de polarización anódica potencioestáticas y potenciodinámicas repetibles que reproducirán datos desarrollados en otros laboratorios en diferentes periodos.

1.2 Los valores mostrados en el sistema internacional de unidades son tomados como estándar. Las unidades libra-pulgada dadas entre paréntesis son para información únicamente.

1.3 *Esta norma no pretende abordar todo lo concerniente a la seguridad asociada con su uso. Es responsabilidad del usuario establecer las medidas de seguridad e higiene adecuadas y determinar con anterioridad la aplicabilidad de las limitaciones reguladoras a utilizar.*

2. Documentos de referencia

2.1 **Normas ASTM:**

E 1338 Guía para la identificación de metales y aleaciones en bases de datos computarizadas de las propiedades de los materiales.

G 3 Práctica para las convenciones aplicables a las mediciones electroquímicas en pruebas de corrosión.

G 107 Guía para los formatos de colección y compilación de datos de corrosión de metales para la entrada a bases de datos computarizadas.

3. Importancia y uso

3.1 La disponibilidad de un procedimiento, material y gráfica estándar deberá facilitar a un investigador la revisión de sus técnicas. Esto deberá

conducir a las curvas de polarización en la bibliografía las cuales pueden ser comparadas con confianza.

3.2 Las muestras de acero inoxidable férnico estándar AISI Tipo 430 (UNS S43000) usadas en la obtención de la gráfica de referencia estándar están disponibles para cualquiera que desee revisar su propio procedimiento y equipo de prueba.

3.3 Las gráficas estándar de polarización potencioestática y potenciodinámica son suministradas con la adquisición del material de referencia. Estos datos de referencia están basados en los resultados de diferentes laboratorios que siguieron el procedimiento estándar usando este material en 1.0 N H₂SO₄. Los valores máximos y mínimos de corriente son mostrados a cada potencial para indicar el rango de valores aceptable.

3.4 Este método de prueba puede no ser apropiado para pruebas de polarización de todos los materiales o en todos los medios.

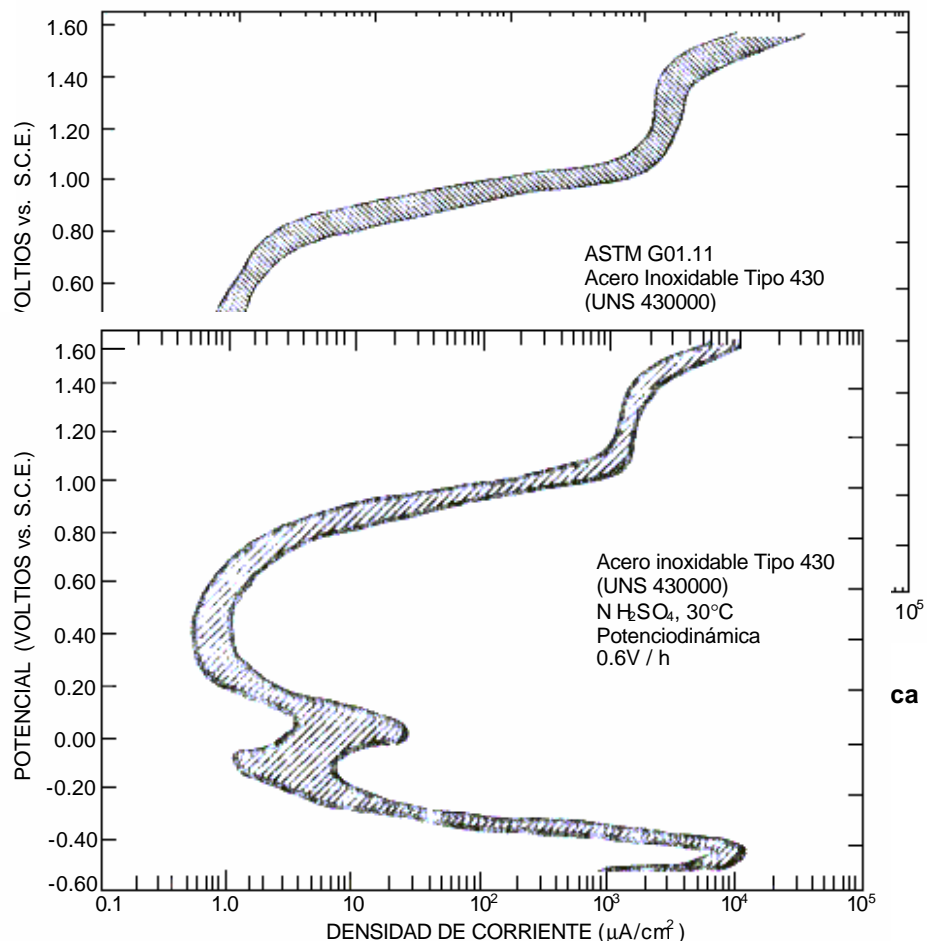
3.5 Este método de prueba esta destinado para la evaluación de la precisión de un equipo de prueba electroquímico dado, y no para evaluar el comportamiento de los materiales. Por lo tanto, el uso de las gráficas 1 y 2 o el apéndice X2 no es recomendado para evaluar aleaciones diferentes del tipo 430, u otras disponibles por la ASTM. El uso de los datos en este método de prueba en esta forma está mas allá del alcance y la utilización destinada de este práctica. Los usuarios de este método de prueba son asesorados para evaluar los resultados de la prueba con relación a las franjas de dispersión correspondientes al acero inoxidable tipo 430 en particular que fue probado.

4. Equipos

4.1 La celda de prueba deberá ser construida para permitir que los siguientes elementos sean insertados dentro de la recámara de la solución: el electrodo de prueba, dos electrodos auxiliares, un capilar Luggin con conexión de puente salino al electrodo de referencia, entrada y salida para un gas inerte, y un termómetro. La celda de prueba podrá ser construida de materiales que no se corroan, deterioren, o de otra forma, contaminarían la solución de prueba.

Nota 1: los cristales de borosilicato y TFE- fluorocarbon se han encontrado apropiados.

4.1.1 Una celda adecuada es mostrada en la figura 3. Un matríz de fondo redondo de un litro ha sido modificado para la adición de varios cuellos apropiados para permitir la introducción de los electrodos, tubos de entrada y salida de gases, y un termómetro. La sonda del puente salino de Luggin separa la solución del electrodo de referencia de calomel saturado, y la punta de la sonda puede ser fácilmente ajustada para llevarlo muy cerca del electrodo de trabajo.



4.2 Potenciostato (Nota 2):

4.2.1 Deberá ser usado un potenciostato que mantendrá un potencial de electrodo dentro de 1 mV de un valor preestablecido sobre un amplio rango de corrientes aplicadas. Para el tipo y tamaño de la muestra estándar suministrada, el potenciostato deberá tener un rango de potencial de -0.6 a $+1.6$ voltios y un rango de corriente anódica de salida de 1.0 a $10^5 \mu\text{A}$.

4.3 Instrumentos de medición del potencial (Nota 2):

4.3.1 El circuito de medición del potencial deberá tener una alta impedancia de entrada en el orden de 10^{11} a $10^{14} \Omega$ para minimizar la corriente inducida desde el sistema durante las mediciones. Tales circuitos son proporcionados con la mayoría de los potenciostatos. Los instrumentos deberán tener suficiente sensibilidad y precisión para detectar un cambio de 1.0 mV sobre un rango de potenciales entre -0.6 y 1.6 V.

4.4 Instrumentos de medición de corriente (Nota 2):

4.4.1 Deberá ser usado un instrumento que sea capaz de medir una corriente con una precisión del 1% del valor absoluto sobre un rango de corriente entre 1.0 y $10^5 \mu\text{A}$ para una muestra de acero inoxidable Tipo 430 (UNS S43000) con un área superficial de aproximadamente 5cm^2 .

4.5 Circuito de polarización anódica:

4.5.1 Un diagrama esquemático de la conexión eléctrica para la polarización anódica potencioestática es mostrado en la figura 4.

4.5.2 Un potenciostato de escaneo es usado para las mediciones potenciodinámicas. Para tales mediciones el potenciostato será capaz de variar automáticamente el potencial a una velocidad constante entre dos potenciales preestablecidos. Un registro del potencial y la corriente es graficado continuamente usando tales instrumentos como un registrador X-Y y un convertidor logarítmico incorporado dentro del circuito mostrado en la figura 4. Algunos potenciostatos tienen una salida del logaritmo de la corriente como un voltaje, lo cual permite trazado directo la curva de potencial – logaritmo de la corriente usando un registrador X-Y.

Nota 2: los requerimientos instrumentales están basados sobre valores típicos de los instrumentos de 15 laboratorios.

4.6 Soporte del electrodo:

4.6.1 Los electrodos auxiliar y de trabajo son montados en el tipo de soporte mostrado en la figura 5. Se requiere un soporte más grande para el electrodo de trabajo que para el electrodo auxiliar. Un montaje sin fugas es obtenido mediante la compresión apropiada entre el electrodo y una junta de TFE-fluorocarbon. (mucha presión puede causar un apantallamiento del electrodo o una rotura del soporte de vidrio, y muy poca presión puede causar fuga y posteriormente la corrosión por agr la prueba).

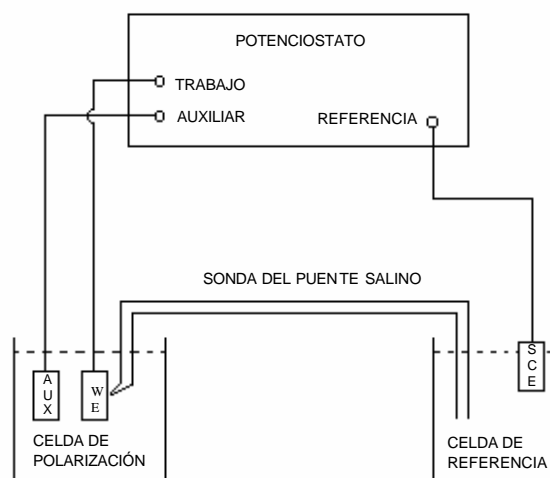


Figura 4. Diagrama esquemático de la conexión eléctrica para la polarización anódica

4.7 Electrodo:

4.7.1 Electrodo de trabajo: elaborado con una longitud de 12.7-mm ($\frac{1}{2}$ -in) y 9.5-mm ($\frac{3}{8}$ -in.) de diámetro. Cada electrodo es taladrado y montado de la forma discutida en 4.6.1.

Nota 3: si son usadas muestras de forma diferente a las requeridas por este método, por ejemplo, una lámina lisa, debe tenerse cuidado ya que ésta puede presentar agrietamientos lo cual puede llevar a resultados erróneos (Ver figura X1.1).

4.7.1.1 El acero inoxidable estándar AISI Tipo 430 (UNS S43000) deberá ser usado si se desea reproducir una gráfica de referencia estándar. Este material es preparado de una barra metálica que es fresada y templada a 815°C (1500°F) por $\frac{1}{2}$ h y enfriada al aire libre. La composición química del acero inoxidable estándar es suministrado con la compra del material de referencia.

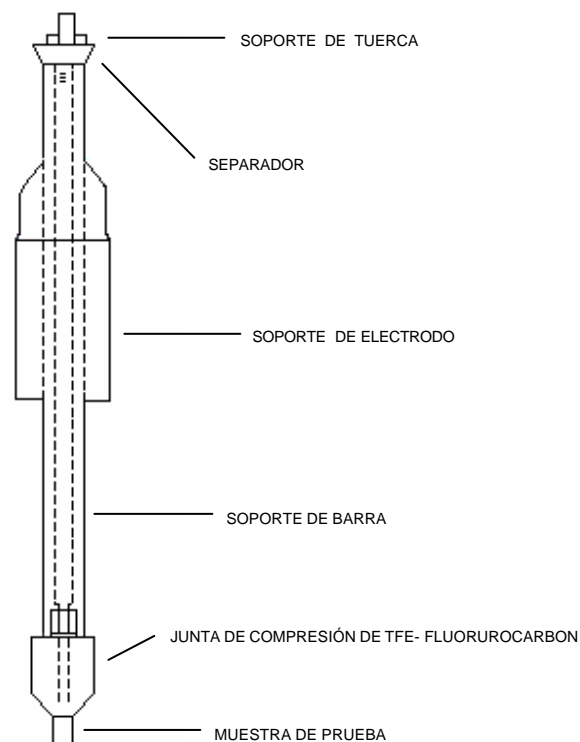


Figura 5. Muestra montada en el soporte de electrodo

4.7.2 *Electrodos auxiliares:*

4.7.2.1 Dos electrodos auxiliares de platino son elaborados de una barra de alta pureza. Cada electrodo es taladrado y montado con una junta de TFE-fluorocarbon de la misma manera que el electrodo de trabajo. También es aceptable una lámina larga de platino encerrada dentro de un soporte de vidrio.

4.7.2.2 Una superficie platinizada puede ser utilizada debido al incremento del área de la superficie. Esto puede ser realizado limpiando la superficie con agua regia caliente (3 partes concentradas de HCl y 1 parte concentrada de HNO₃), lavándola y luego secándola. Ambos electrodos son platinizados sumergiéndolos en una solución de cloruro de platino al 3% y acetato de plomo al 0.02% y electrolizándolos a una densidad de corriente de 40 a 50 mA/cm² por 4 o 5 minutos. La polaridad es invertida cada minuto. El cloruro obstruido es removido electrolizándolo en una solución de ácido sulfúrico (10%) diluido por varios minutos con un cambio de polaridad cada minuto. Los electrodos son enjuagados completamente y se almacenan en agua destilada hasta que estén listos para usarlos. Debido a que ciertos iones pueden contaminar estos electrodos, deberán hacerse revisiones periódicas de los potenciales del platino contra un electrodo de referencia conocido.

4.7.2.3 Alternativamente, pueden ser usados electrodos auxiliares de grafito, pero el material retenido por el grafito puede contaminar los experimentos siguientes. Esta contaminación puede ser minimizada usando grafito de alta densidad o ser evitada reemplazando habitualmente el electrodo de grafito.

4.7.3 *Electrodo de referencia:*

4.7.3.1 Es recomendado un electrodo de calomel saturado con una velocidad de fuga controlada (cerca de $3 \mu\text{L/h}$). Este tipo electrodo es duradero, fiable, y está disponible comercialmente. Deberán tenerse las precauciones para garantizar que éste es mantenido en la condición correcta. El potencial del electrodo de calomel deberá ser revisado a intervalos periódicos para garantizar su precisión. Para otras combinaciones de aleación-electrolito un electrodo de referencia diferente puede ser preferido a fin de evitar la contaminación del electrodo de referencia o del electrolito.

4.7.3.2 Alternativamente, puede ser utilizado un electrodo de calomel saturado con una membrana semipermeable o de punta porosa. Estos pueden requerir un cuidado especial.

5. Procedimiento experimental

5.1 Prepare 1 litro de $1.0 \text{ N H}_2\text{SO}_4$ de A.C.S. (al 100%) y agua destilada, por ejemplo, si usa 27.8 mL de 98% de $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{L}$ de solución, transfiera 900 mL de solución a la celda de polarización limpia.

5.2 Coloque los electrodos auxiliares platinizados, la sonda del puente salino, y los otros componentes en la celda de prueba y cierre temporalmente con un tapón de vidrio. Llene el puente salino con la solución de prueba.

Nota 4: cuando se esta usando un puente salino de fuga controlada, los niveles de la solución en las celdas de referencia y de polarización deberán ser los mismos para evitar el sifonamiento. Si esto es imposible, una llave de paso de solución húmeda (no engrasada), una membrana semipermeable o un tapón de punta porosa pueden ser usados en el puente salino para eliminar el sifonamiento.

5.3 Lleve la temperatura de la solución a $30 \pm 1^{\circ}\text{C}$ mediante la inmersión de la celda de prueba en un baño de agua de temperatura controlada o por otros medios convenientes.

5.4 Reduzca los niveles de oxígeno en la solución antes de la inmersión de la muestra de prueba. Esto puede ser realizado burbujeando de un gas libre de oxígeno como hidrógeno, argón o nitrógeno a una velocidad de $150\text{cm}^3/\text{min}$ por un mínimo de $\frac{1}{2}$ h.

5.5 Prepare la superficie del electrodo de trabajo por lo menos una hora antes del experimento. Pula con lija de agua de SiC # 240 y #600, hasta que las asperezas sean removidas; enjuague y seque. (las muestras perforadas pueden ser enroscadas sobre una barra del soporte de electrodo y aseguradas en un torno o taladro eléctrico para esta operación).

5.6 Determine el área de la superficie midiendo todas las dimensiones cercanas a 0.01 mm, substrayendo el área bajo la junta (usualmente de 0.2 a 0.25 cm^2).

5.7 Monte la muestra en el soporte de electrodo como se describió en 4.6.1. Apriete el montaje sujetando el extremo superior del soporte de barra en una abrazadera mientras se aprieta el soporte de tuerca hasta que la junta esté comprimida apropiadamente.

5.8 Desengrase la muestra justo antes de sumergirla y luego lávela en agua destilada.

5.9 Transfiera la muestra a la celda de prueba y ajuste la punta de la sonda del puente salino a una distancia de 2 ó 3 mm o a 2 veces el diámetro de la punta, del electrodo de prueba .

5.10 Registre el potencial de circuito abierto de la muestra, esto es, el potencial de corrosión, después de 55 minutos de inmersión. Si son usados el contraelectrodo de platino y el gas hidrógeno, registre el potencial de platino 50 minutos después de la inmersión de la muestra.

5.11 *Barrido de potencial:*

5.11.1 Inicie el barrido de potencial 1 hora después de la inmersión de la muestra, comenzando al potencial de corrosión (E_{corr}) para medidas potenciodinámicas, y 50 mV por encima del E_{corr} para las medidas potencioestáticas. Siga hasta +1.60 V contra el electrodo de calomel saturado (SCE) (activa a noble).

5.11.2 En el método potencioestático, utilice una velocidad de paso de potencial potencioestático de 50 mV cada 5 minutos, registrando la corriente al final de cada período de 5 minutos. Estos pasos son repetidos hasta que es alcanzado un potencial de +1.6 V contra el electrodo de calomel saturado.

5.11.3 En el método potenciodinámico, use una velocidad de barrido de potencial potenciodinámico de 0.6 V/h ($\pm 5\%$), registrando la corriente continuamente con cambios en el potencial desde el potencial de corrosión hasta +1.6 V SCE.

5.12 Grafique los datos de polarización anódica en papel semilogarítmico de acuerdo con la práctica G 3 (potencial-ordenada, densidad de corriente-abcisa). Si es usado un potencioestato con un convertidor logarítmico esta gráfica puede ser producida directamente durante la medición.

6. Gráficas de referencia estándar

6.1 Las gráficas de polarización estándar preparadas de los datos obtenidos siguiendo el procedimiento estándar discutido en este método de prueba, son suministradas con la adquisición del material de referencia. Los datos

típicos son mostrados en la figura 1 y 2. Las gráficas muestran un rango de valores aceptables de densidad de corriente a cada potencial. El potencial de corrosión promedio es -0.52 V, y el potencial de platino promedio es de -0.26 V.

Nota 5: Las gráficas en las figuras 1 y 2 corresponden a una muestra de acero inoxidable tipo 430 que ya no está disponible por ASTM (después de julio de 1992). Las figuras 1 y 2 presentadas principalmente para la discusión de la precisión y desviación en las secciones 6 y 7, y el apéndice X1. Las franjas de dispersión presentadas en el apéndice X2 fueron desarrolladas a partir de un programa de prueba en la muestra de acero inoxidable tipo 430 que está disponible por ASTM actualmente.

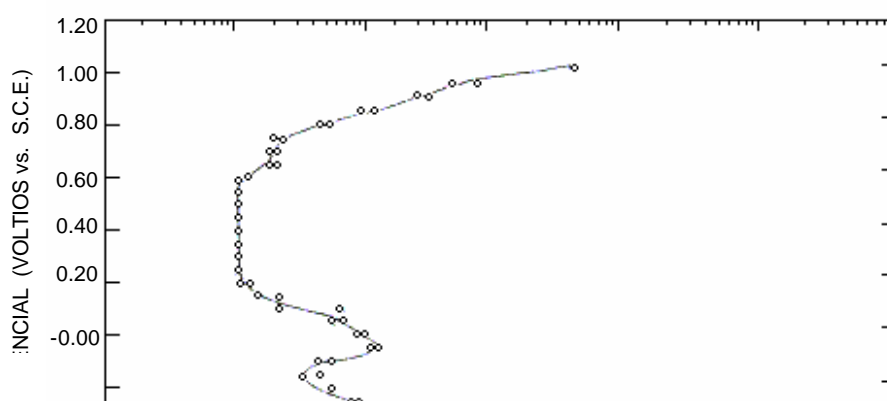
6.2 Las desviaciones típicas de la gráfica potenciostática estándar son mostradas y discutidas en el apéndice X1. La referencia para esta discusión puede ser de mucha ayuda en la determinación de los motivos de las diferencias entre una curva experimental y las gráficas estándar.

6.3 La curva potenciodinámica estándar muestra una buena concordancia con la curva potenciostática determinada a una velocidad de polarización general equivalente.

6.4 Las diferencias en el tamaño y ubicación de las franjas de dispersión presentadas en las figuras 1 y 2 contra las del apéndice X2 son atribuidas a diferencias menores en las dos barras de acero inoxidable tipo 430 que fueron evaluadas separadamente.

7. Precisión y desviación

7.1 La repetición de este método de prueba está siendo desarrollado. Sin embargo, en la figura 6 es mostrada la repetición en una prueba interna de laboratorio previa en la cual un material fue probado dos veces.



7.2 La reproducibilidad de este método de prueba está siendo desarrollada mediante pruebas internas de laboratorio.

7.3 En este método de prueba no hay desviación porque la curva potenciodinámica está definida solamente en términos de este método.

Denominación: G59 – 91

Práctica estándar para la realización de mediciones de resistencia de polarización potenciodinámica

Esta norma es emitida bajo la denominación G 59, el número siguiente a la denominación indica el año de adopción original o, en el caso de revisión, el año de la última revisión. Un número entre paréntesis indica el año de la última reprobación. Un superíndice epsilon (ϵ) indica un cambio de editorial desde la última revisión o reprobación.

1. Alcance

1.1 Esta práctica describe un procedimiento experimental para las mediciones de resistencia de polarización, la cual permite al investigador calibrar su equipo y probar sus métodos para tales mediciones. La resistencia de polarización, R_p , de

un electrodo corroyéndose está definida como la pendiente de una gráfica de potencial E – densidad de corriente i , en el potencial de corrosión E_{corr} :

$$R_p = \left(\frac{\partial \Delta E}{\partial i} \right)_{\Delta E = 0} \quad (1)$$

donde $\Delta E = E - E_{corr}$, es la polarización desde el potencial de corrosión e i es la densidad de corriente (d.c.) correspondiente a un valor particular de ΔE . De la resistencia de polarización R_p puede ser calculada la corriente d.c. de corrosión i_{corr} :

$$i_{corr} = \frac{B}{R_p} \quad (2)$$

donde B es una combinación de las pendientes de Tafel anódica y catódica (b_a , b_c):

$$B = \frac{b_a b_c}{2.303(b_a + b_c)} \quad (3)$$

Las dimensiones de R_p son $\text{ohm} \cdot \text{cm}^2$. Las ventajas de las mediciones de polarización son la posibilidad de registrar velocidades de corrosión instantáneas y el uso de esta técnica para el monitoreo en línea de un gran número de procesos en los cuales la corrosión puede causar problemas.

1.2 Son incluidas las curvas de polarización estándar. Estos datos de referencia están basados en los resultados de ocho diferentes laboratorios que siguieron el procedimiento estándar usando el acero inoxidable estándar AISI Tipo 430 (UNS S43000) en 1 N de H_2SO_4 . Este procedimiento es muy similar al descrito en la práctica G 5. También se incluyen curvas las cuales han sido construidas usando análisis estático para indicar el rango aceptable de las curvas de polarización.

1.3 Las muestras de acero inoxidable estándar AISI Tipo 430 (UNS S43000) usadas en la obtención de la gráfica de referencia estándar están disponibles para cualquiera que desee revisar su procedimiento y equipo de prueba.

1.4 Los procedimientos de prueba descritos en esta práctica pueden no ser apropiados para la medida de la resistencia de polarización en todos los materiales o en todos los medios.

1.5 Esta norma no pretende abordar todo lo concerniente a la seguridad asociada con su uso. Es responsabilidad del usuario establecer las medidas de seguridad e higiene adecuadas y determinar con anterioridad la aplicabilidad de las limitaciones reguladoras a utilizar.

2. Documentos de referencia

2.1 Normas ASTM:

G 3 Práctica para las convenciones aplicables a las mediciones electroquímicas en pruebas de corrosión.

G 5 Método de prueba de referencia para la realización de mediciones de polarización anódica potencioestática y potenciodinámica.

G 15 Terminología relacionada con la corrosión y pruebas de corrosión.

G 106 Práctica para la verificación del algoritmo y del equipo para mediciones de impedancia electroquímica.

2.2 Apéndice:

Muestras de acero inoxidable estándar AISI Tipo 430 (UNS S43000)

3. Equipos

3.1 Los equipos utilizados son descritos en la práctica G 5. Son necesarios una celda de polarización estándar o cualquier celda que pueda ser usada para reproducir la curva estándar mostrada en la práctica G 5, un soporte de electrodo para la muestra de prueba, la muestra de prueba, un electrodo de referencia y un electrodo auxiliar. El potencioestato debe ser del tipo que permita la aplicación de un barrido de potencial. Es aconsejable que el potencioestato tenga salidas para potencial y corriente en forma de un voltaje contra tierra, el cual realiza el registro de la curva de polarización en un registrador X – Y más conveniente.

4. Procedimiento experimental estándar

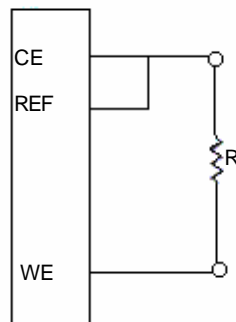
4.1 Las muestras deberán ser preparadas como se describe en la práctica G 5, la cual involucra el pulimento con una lija de agua de SiC #600 con anterioridad al experimento con un tiempo de anticipación de máximo 1 hora.

4.2 Prepare 1.0 N H_2SO_4 (al 100%) y agua destilada. Lleve a cabo la prueba a $30 \pm 1^\circ C$.

4.3 Por lo menos $\frac{1}{2}$ hora antes de la inmersión de la muestra comience a purgar la solución con hidrógeno libre de oxígeno a una velocidad de flujo de $150 \text{ cm}^3/\text{min}$. Continúe purgando durante toda la prueba.

5. Prueba del equipo eléctrico

5.1 Antes de hacer la medición de la resistencia de polarización, el sistema eléctrico (potenciostato, registrador X-Y) debe ser probado a fin de asegurar su correcto funcionamiento. Para este propósito conecte el potenciostato a una celda falsa. Mientras que en estudios electroquímicos a veces son necesarias celdas falsas mas complejas, el resistor simple mostrado en la figura 1 es adecuado para las presentes necesidades.



R = Resistor de prueba
 CE = Contraelectrodo
 REF = Electrodo de Referencia
 WE = Electrodo de Trabajo

**Figura 1. Arreglo para la prueba del equipo eléctrico
(potenciostato, registrador X-Y)**

5.2 Use $R = 10 \, \Omega$. Fije el potencial aplicado en el potenciostato a $E = -30 \, \text{mV}$ y aplique el potencial. La corriente debe ser $I = E/R = 3 \, \text{mA}$.

Nota 1: cuando los valores de resistencia de polarización son medidos para sistemas con altas o bajas corrientes de corrosión, el valor de R deberá ser escogido para cubrir el rango de corriente de la medida de resistencia de polarización real. Para corrientes de corrosión en el rango de microamperios, se debe escoger $R = 1$ a $10 \, \text{K}\Omega$.

5.3 Registre la curva de polarización potenciodinámica ($0.6 \, \text{V/h}$) desde $E = -30 \, \text{mV}$ hasta $E = +30 \, \text{mV}$ y regrese a $E = -30 \, \text{mV}$. La gráfica deberá ser lineal, pasar por el origen, y tener una pendiente de $R = 10 \, \Omega$. Las curvas registradas por el barrido de potencial hacia delante y hacia atrás deberán ser idénticas.

5.4 En el caso en que la curva de polarización registrada no pase por el origen o no tenga la pendiente correcta, o ambas, calibre el potenciostato y el registrador X-Y de acuerdo con las especificaciones del fabricante.

6. Procedimiento de prueba electroquímico

6.1 Transfiera la muestra de prueba a la celda y ajuste la punta de la sonda del puente salino a una distancia de 2 ó 3 mm de la superficie del electrodo de prueba.

6.2 Registre el potencial de corrosión E_{corr} después de 5 y 55 minutos de inmersión. Registre el potencial de platino (electrodo auxiliar) 50 minutos después de la inmersión de la muestra de prueba.

6.3 Fije el potencial aplicado a 30 mV más negativo que el potencial de corrosión registrado (Nota 2). Aplique este potencial y ajuste la sensibilidad del registrador X-Y de tal forma que la lectura de corriente sea hecha a plena escala.

Nota 2: para la definición de los signos del potencial y de la corriente, ver la práctica G 3.

6.4 Un minuto después de la aplicación del potencial, inicie el escaneo del potencial anódico a una velocidad de barrido de 0.6 V/h ($\pm 5\%$), registrando el potencial y la corriente continuamente. Termine el barrido de potencial cuando sea alcanzado un potencial de 30 mV positivo en relación con el potencial de corrosión.

6.5 Grafique la curva de polarización como una gráfica lineal de potencial – densidad de corriente, como la mostrada en la práctica G 3. Determine la resistencia de polarización, R_p , gráficamente como la tangente de la curva en el origen de la gráfica ($DE = 0$).

7. Gráficas de referencia estándar

7.1 Las curvas de polarización estándar basadas en los datos suministrados por ocho laboratorios son mostradas en la figura 2. Estas curvas fueron construidas de los datos de la tabla 1, la cual contiene los valores medios, M , de la resistencia de polarización, R_p , las pendientes de Tafel, b_a y b_c , la constante B , y la densidad de corriente de corrosión, i_{corr} , calculada de acuerdo a la ecuación 2. Las pendientes de Tafel fueron obtenidas en experimentos separados de las líneas de Tafel (gráficas semilogarítmicas). También se incluyen la desviación estándar, SD , y el error estándar de la media, SE , calculados de los datos reportados por los ocho laboratorios participantes en la prueba. Estos datos individuales son mostrados en el apéndice X1, el cual contiene también los valores del potencial de corrosión, E_{corr} , y el potencial de platino, E_{Pt} .

7.2 Las curvas 1 a 3 en la figura 2 fueron construidas de acuerdo a la ecuación 4, la cual describe una curva de polarización para reacciones de transferencia de carga:

$$i = i_{\text{corr}}$$

$$\left\{ \exp\left(\frac{2.303 \Delta E}{b_a}\right) - \exp\left(-\frac{2.303 \Delta E}{b_c}\right) \right\} \quad (4)$$

Para la curva 1 fueron usados los valores medios de i_{corr} , b_a , y b_c de la tabla 1. Las otras dos curvas representan el 95% de los límites de confiabilidad. Estos límites son iguales a los tiempos de la curva 1 o divididos por e^{2S} donde S esta determinada por:

$$S^2 = \frac{\sum (\ln I_i - \ln I_1)^2}{105}$$

Los valores de $(\ln I_i - \ln I_1)$ son las desviaciones de los logaritmos de la corriente de cada curva de laboratorio en los intervalos de 1 a 3 mV. Es de esperarse que el 95% de todos los datos estén dentro de estos rangos limites.

7.3 Las curvas de polarización medidas reportadas por los ocho investigadores caen dentro del rango mostrado en la figura 2. Cuando el experimento es repetido de acuerdo a este método de referencia estándar el valor de la resistencia de polarización, R_p , calculada de la curva de polarización debe estar dentro de los límites: $R_p \pm 2 SD$: 6.11 a 12.27 ohm*cm²

7.4 Esta práctica no necesariamente determinará apropiadamente las medidas de resistencia de polarización en medios diferentes a 1 N H₂SO₄. Para otras aleaciones u otros medios *ASTM* actualmente no tiene información.

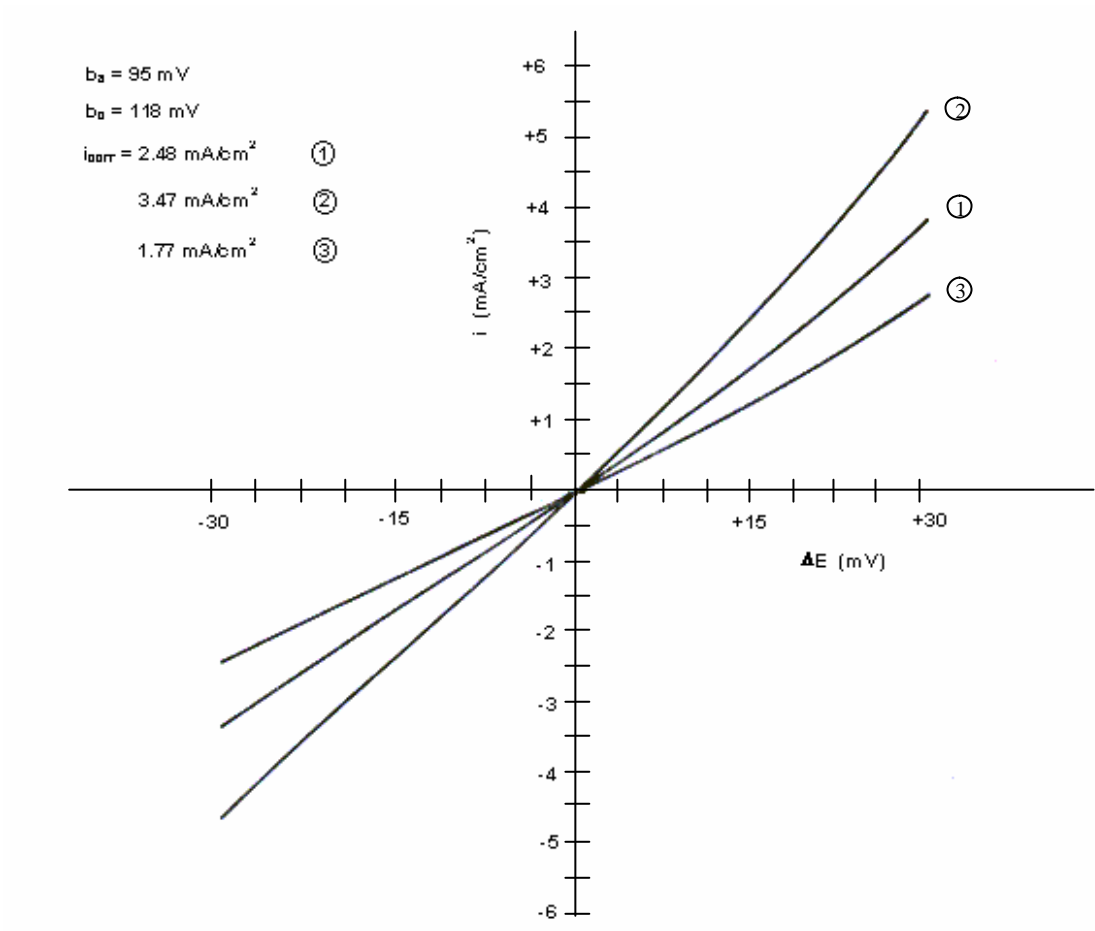


Figura 2. Curvas de polarización estándar

Tabla 1. Datos de polarización para el acero inoxidable tipo 430, 1N H₂SO₄, H₂, 30°C

M	SD	SE
---	----	----

R_p (ohm*cm ²)	9.19	1.54	0.54
b_a (mV)	95	18	6
b_c (mV)	118	16	6
B (mV)	22.8	3.6	1.3
I_{corr} (mA/cm ²)	2.49	0.19	0.07

8. Palabras claves

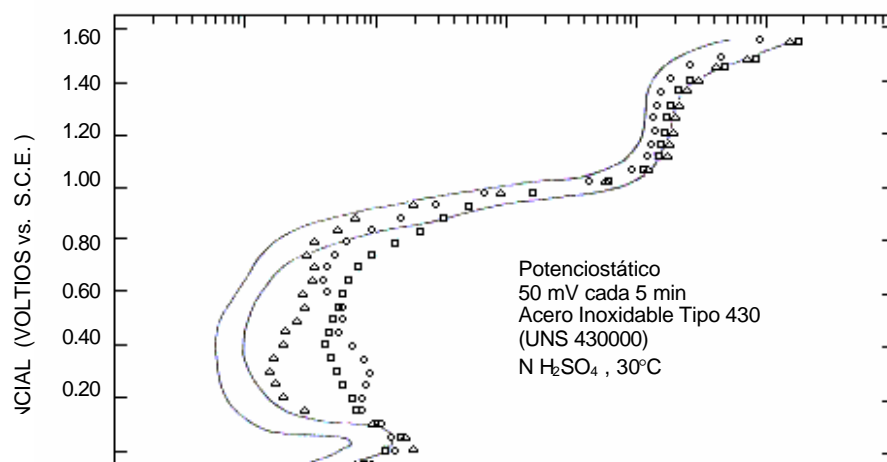
8.1 Polarización anódica; electrodo auxiliar; polarización catódica; corrosión; potencial de corrosión; densidad de corriente; celda electroquímica; potencial electroquímico; sonda de Luggin; potencial mixto; potencial de circuito abierto; sobrevoltaje; resistencia de polarización; potenciodinámica; pendiente de Tafel; electrodo de trabajo.

APÉNDICE

X1. DESVIACIÓN DE LOS DIAGRAMAS DE POLARIZACIÓN ESTANDAR

X1.1 Altas densidades de corriente pasiva (efecto de agrietamiento)

X1.1.1 Los ejemplos de densidades de corriente pasiva las cuales son más grandes para una gráfica potencioestática estándar son mostrados en la figura X1.1 Este efecto es atribuible al agrietamiento entre la muestra y el soporte del material. El agrietamiento puede ser el resultado de la técnica de montaje o del material usado para el montaje.



X1.1.2 La caída de potencial a lo largo de la trayectoria del electrolito dentro de la grieta entre la muestra y el soporte del material previene a esa área de la pasivación. Aunque la cara de la muestra se pasiva, la alta densidad de corriente asociada con la grieta activa contribuye a incrementar la densidad de corriente medida. Los electrodos de muestra para las mediciones de polarización deben ser montados sin grietas para evitar tales densidades de corriente pasiva erróneas.

X1.2 Bajas densidades de corriente pasiva (efecto instrumental)

X1.2.1 Las bajas densidades de corriente pasiva que se muestran en la figura X1.2, son indudablemente el resultado de problemas instrumentales. Este efecto puede ser eliminado calibrando la corriente sobre el rango completo de interés antes de la realización de un experimento.

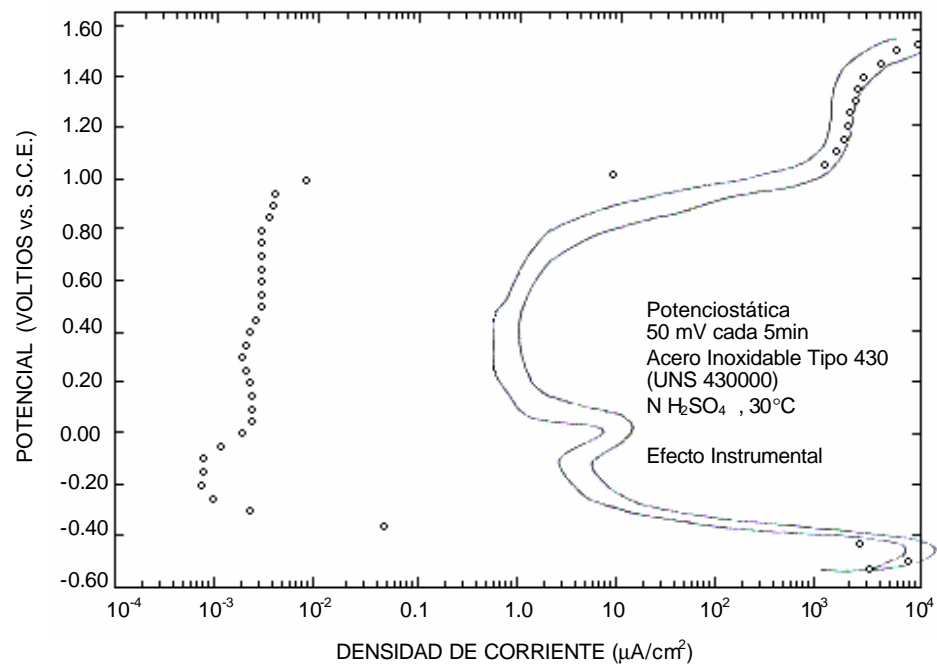


Figura X1.2 Efecto instrumental durante la polarización anódica

X1.3 Corrientes catódicas durante la polarización anódica (efecto del oxígeno)

X1.3.1 El “lazo negativo” a potenciales entre -0.350 V y -0.050 V, mostrado por líneas a trazos en la figura X1.3, ocurre cuando la corriente catódica total excede la corriente anódica total. Tales resultados son característicos de la presencia de oxígeno en la solución. Este efecto puede ser anticipado si el potencial del platino registrado es considerablemente más noble que -0.26 V. El gas de purgado deberá remover el oxígeno del sistema, pero allí puede estar una fuga de aire o el gas de purgado puede estar contaminado con

oxígeno. Es necesario tener mucho cuidado en el diseño del equipo de vidrio y asegurar un alto grado de pureza en el gas que es usado para evitar la contaminación de oxígeno.

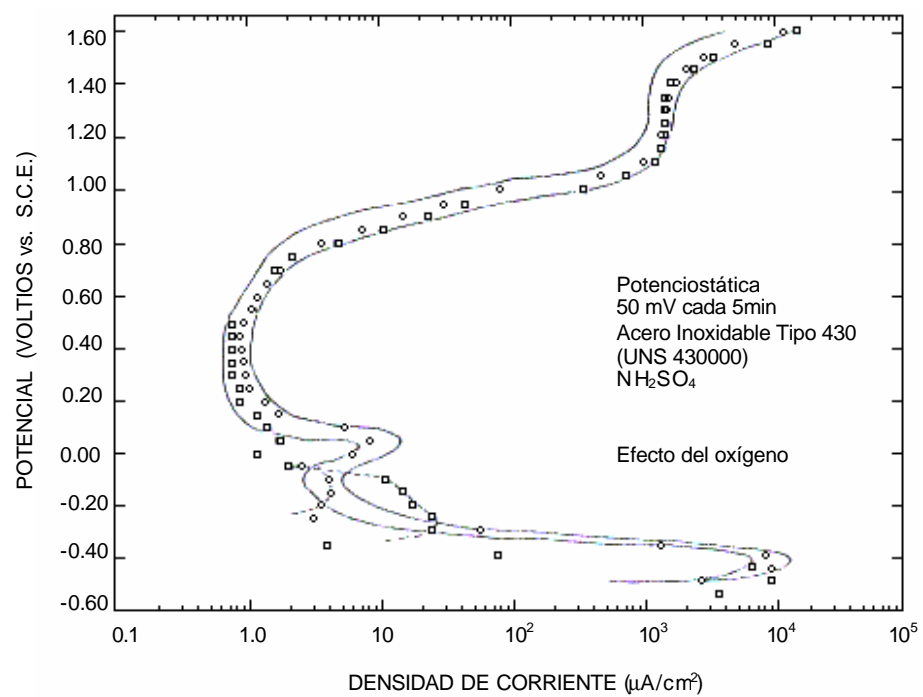


Figura X1.3 Efecto del oxígeno durante la polarización anódica

Denominación: G 61 – 86

Método de prueba estándar para la realización de mediciones de polarización potenciodinámica cíclica para la sensibilidad a la corrosión localizada de aleaciones basadas en hierro, níquel o cobalto

Esta norma es emitida bajo la denominación G 61, el número siguiente a la denominación indica el año de adopción original o, en el caso de revisión, el año de la última revisión. Un número entre paréntesis indica el año de la última reaprobación. Un superíndice epsilon (e) indica un cambio de editorial desde la última revisión o reaprobación.

1. Alcance

1.1 Este método de prueba proporciona un procedimiento para la realización de mediciones de polarización potenciodinámica cíclica para determinar la sensibilidad relacionada con la corrosión localizada (corrosión por picadura y por hendidura) para aleaciones basadas en hierro, níquel, o cobalto en un medio de cloruro. Este método de prueba también describe un procedimiento experimental el cual puede ser usado para revisar algunas técnicas experimentales e instrumentación.

1.2 *Esta norma puede involucrar materiales, operaciones y equipos peligrosos. Esta norma no pretende abordar todo lo concerniente a la seguridad asociada con su uso. Es responsabilidad del usuario establecer las medidas de seguridad e higiene adecuadas y determinar con anterioridad la aplicabilidad de las limitaciones reguladoras a utilizar.*

2. Documentos de referencia

2.1 Normas ASTM:

D 1193 Especificaciones para agua reactiva.

G 3 Práctica para las convenciones aplicables a las mediciones electroquímicas en pruebas de corrosión.

G 5 Método de prueba de referencia para la realización de mediciones de polarización anódica potencioestática y potenciodinámica.

3. Importancia y uso

3.1 En este método de prueba, una indicación de la sensibilidad a la iniciación de corrosión localizada está dada por el potencial al cual la corriente anódica aumenta rápidamente. Este potencial más noble es obtenido en esta prueba a una velocidad de escaneo fija, la aleación es la menos sensible a la iniciación de la corrosión localizada. Los resultados de esta prueba no tienen la intención de relacionarse en una forma cuantitativa con la velocidad de propagación que se puede observar en servicio cuando la corrosión localizada ocurre.

3.2 En general, una vez iniciada, la corrosión localizada puede propagarse a un potencial más electropositivo que el potencial al cual el lazo de histéresis es completado. En este método de prueba, el potencial al cual el lazo de histéresis se completa, está determinado a una velocidad de escaneo fija. En estos casos, el potencial más electropositivo al cual el lazo de histéresis es completado es el menos apropiado, esto es, que la corrosión localizada ocurrirá.

3.3 Si es seguido, este método de prueba proporcionará mediciones de polarización anódica potenciodinámica cíclica que reproducirán datos desarrollados en otros laboratorios en diferentes periodos usando este método de prueba para las dos aleaciones específicas discutidas en 3.4. El

procedimiento es usado para aleaciones basadas en hierro, níquel, o cobalto en un medio cloruro.

3.4 Es incluida una gráfica de polarización potenciodinámica estándar. Estos datos de referencia están basados en los resultados de cinco diferentes laboratorios que siguieron el procedimiento estándar, usando aleaciones específicas de acero inoxidable Tipo 304, UNS S30400 y aleación C-276, UNS N10276. Las curvas incluidas han sido construidas usando análisis estático para indicar el rango aceptable de las curvas de polarización.

3.5 La disponibilidad de un método de prueba, material y gráficas estándar facilitarán al investigador la revisión de sus técnicas para evaluar la sensibilidad a la corrosión localizada.

4. Equipos

4.1 La celda de polarización deberá ser similar a la descrita en la práctica G 5. Igualmente otras celdas de polarización pueden ser adecuadas.

4.1.1 La celda deberá tener una capacidad de 1 litro aproximadamente y deberá tener cuellos o juntas apropiadas para permitir la introducción de los electrodos, tubos de entrada y salida de gases, y un termómetro. La sonda del puente salino de Luggin separa el volumen de solución de el electrodo de referencia de calomel saturado. La punta de la sonda deberá ser ajustada para llevarla muy cerca del electrodo de trabajo.

4.2 Soporte de electrodo:

4.2.1 Las muestras deberán ser montadas en un soporte adecuado diseñado para una superficie lisa, exponiendo 1 cm^2 a la solución de prueba (figura 1). Tal soporte ha sido descrito en la bibliografía. Es importante que la junta circular de TFE-fluorocarbon sea perforada y lisa a fin de minimizar las grietas.

4.3 *Potenciostato* (Nota 1) - Deberá ser usado un potenciostato que mantendrá un potencial de electrodo dentro de 1 mV de un valor presente sobre un amplio rango de corrientes aplicadas. Para el tipo y tamaño de la muestra estándar suministrada, el potenciostato deberá tener un rango de potencial de -1.0 a $+1.6$ voltios y un rango de salida de corriente anódica de 1.0 a $10^5\text{ }\mu\text{A}$. La mayoría de los potenciostatos comerciales satisfacen los requerimientos específicos para estos tipos de mediciones.

Nota 1: estos requerimientos instrumentales están basados en valores típicos de los instrumentos en los cinco laboratorios que han proporcionado los datos usados en la determinación de la gráfica de polarización estándar.

4.4 *Instrumentos de medición del potencial* (Nota 1) – El circuito de medición del potencial deberá tener una alta impedancia de entrada en el orden de $10^{11}\Omega$ a $10^{14}\Omega$ para minimizar la corriente inducida desde el sistema durante las mediciones. Los instrumentos deberán tener suficiente sensibilidad y precisión para detectar un cambio en el potencial de $\pm 1\text{ mV}$, usualmente incluidos en los potenciostatos comerciales. Es preferida una salida como un voltaje para propósitos de registro.

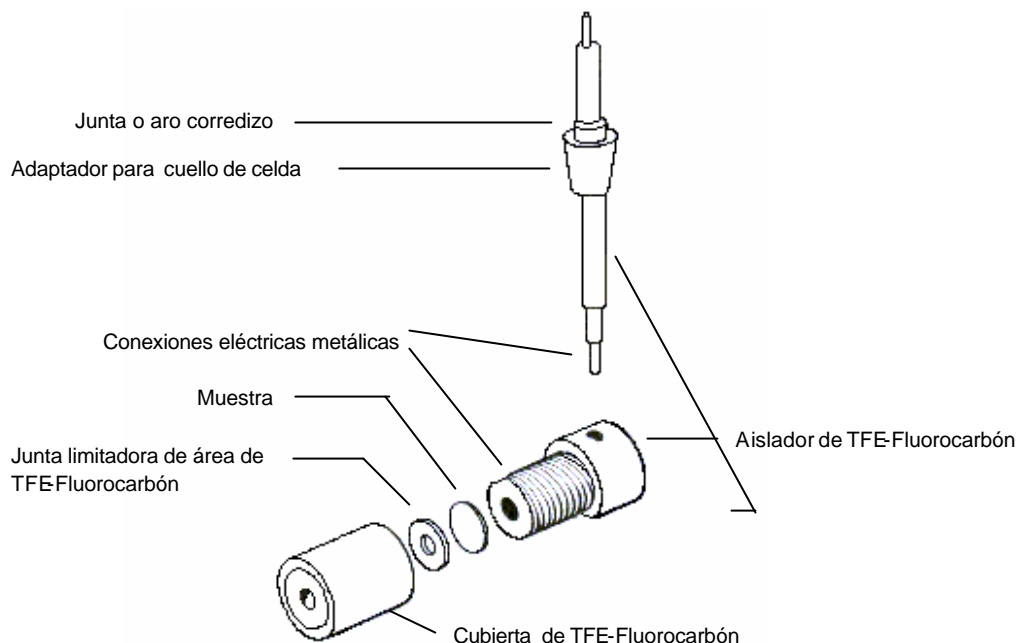


Figura 1. Diagrama esquemático del soporte de la muestra

4.5 *Instrumentos de medición de la corriente* (Nota 1) – Deberá ser usado un instrumento que sea capaz de medir una corriente con una precisión dentro del 1% del valor absoluto sobre un rango de corriente entre 1.0 y $10^5 \mu\text{A}$. La mayoría de las unidades comerciales tienen un instrumento incorporado con una salida como un voltaje, la cual es preferida para propósitos de registro. Para el propósito de la presente prueba es deseable una salida logarítmica.

4.6 *Circuito de polarización anódica* – Un potenciostato de escaneo es usado para las mediciones potenciodinámicas. El potencial y la corriente son graficados continuamente usando un registrador X-Y y un convertidor logarítmico para la corriente (contenido en el potenciostato o incorporado dentro del circuito). Las unidades disponibles comercialmente son apropiadas.

4.7 *Electrodos:*

4.7.1 El acero inoxidable estándar Tipo 304 (UNS S30400) y la aleación C-276 (UNS N10276) deberán ser maquinados como discos lisos de 0.625-in (14-mm) de diámetro. La composición química de las aleaciones usadas están enlistadas en la tabla 1.

4.7.2 *Contraelectrodos* – Los contraelectrodos pueden ser elaborados como se describe en la práctica G 5 o de un alambre de platino de alta pureza. Un método apropiado sería cerrar herméticamente el alambre de platino en un tubo de vidrio e introducir el montaje del electrodo de platino a través de una junta corrediza. Los contraelectrodos deberán tener un área de por lo menos el doble de la del electrodo de prueba.

4.7.3 *Electrodo de Referencia* – Es recomendado un electrodo de calomel saturado con una velocidad de fuga controlada (cerca de 3 $\mu\text{L/h}$). Este tipo electrodo es duradero, fiable, y está disponible comercialmente. Deben tenerse las precauciones para garantizar que éste es mantenido en la condición correcta. El potencial del electrodo de calomel deberá ser revisado a intervalos periódicos para garantizar su precisión.

Tabla 1. Composición química de las aleaciones usadas, Peso %

Elemento	Aleación C-276 (UNS N10276)	Acero inoxidable tipo 304 (UNS 30400)
Carbono	0.003	0.06
Cromo	15.29	18.46
Cobalto	2.05	...
Columbio	...	0.11
Cobre	...	0.17
Hierro	5.78	balance
Manganeso	0.48	1.43
Molibdeno	16.03	0.17

Níquel	balance	8.7
Fósforo	0.018	0.029
Silicio	0.05	0.6
Azufre	0.006	0.014
Vanadio	0.2	...
Tungsteno	3.62	...

5. Reactivos y materiales

5.1 *Pureza de los reactivos* – Químicos de clase reactiva serán usados en todas las pruebas. A no ser que de otra manera indicada, se desee que todos los reactivos se ajusten a las especificaciones del Comité de Reactivos Analíticos de la Sociedad Química Americana, donde tales especificaciones están disponibles. Otras clases pueden ser usadas, siempre que sea determinado primero que el reactivo es de la suficiente alta pureza para permitir su uso sin la disminución de la precisión de la determinación.

5.2 *Pureza del agua* – El agua será destilada o desionizada ajustándose a los requerimientos de pureza de la especificación D1193, agua reactiva Tipo IV.

5.3 *Cloruro de Sodio (NaCl).*

5.4 Las muestras de acero inoxidable estándar Tipo 304 (UNS S30400) y de la aleación C-276 (UNS N10276) usadas en la obtención de la gráfica de referencia estándar están disponibles para quien desee revisar sus propios procedimientos de prueba y equipo.

6. Procedimiento

6.1 Preparación de la muestra de prueba:

6.1.1 Pula con lija de agua de SiC # 240 y #600, hasta que las ralladuras ásperas sean removidas; enjuague y seque.

6.1.2 Antes de ensamblar el soporte de la muestra, desengrase ultrasónicamente la muestra por 5 minutos en detergente y agua, enjuague completamente en agua destilada, y seque.

6.1.3 Monte la muestra en el soporte de electrodo. Apriete el montaje hasta que la junta de TFE-fluorocarbon este lo suficientemente comprimida para evitar fugas en la junta.

6.2 Prepare la solución de cloruro de sodio a 3.56% (por peso) disolviendo 34 gramos de NaCl (al 100%) en 920 mL de agua destilada.

6.3 Ensamble el soporte de electrodo y ubíquelo en la celda de polarización. Transfiera 900 mL de la solución de prueba a la celda de polarización, asegurando que la muestra permanezca por encima del nivel de la solución.

6.4 Lleve la temperatura de la solución a $25 \pm 1^{\circ}\text{C}$ mediante la inmersión de la celda de prueba en un baño de agua de temperatura controlada o por otros medios convenientes.

6.5 Ubique los electrodos auxiliares de platino, la sonda del puente salino, y los otros componentes en la celda de prueba. Llene el puente salino con la solución de prueba y ubique la punta de la sonda aproximadamente a 1 mm del electrodo de trabajo.

Nota 2: los niveles de la solución en las celdas de referencia y de polarización deberán ser los mismos. Si esto es imposible una llave de paso puede ser usada en el puente salino para eliminar el sifonamiento.

6.6 Purgue suficientemente la solución con un gas apropiado para eliminar el oxígeno antes de la inmersión de la muestra (mínimo de 1 hora).

6.7 Sumerja la muestra por 1 hora antes del inicio de la polarización. Una junta corrediza puede ser usada para garantizar que un medio libre de oxígeno es mantenido mientras la muestra es reducida. Es importante que todo el oxígeno sea eliminado antes de la polarización mediante el purgado, de otra forma, serán observados valores de potencial de corrosión iniciales mas nobles.

6.8 Registre el potencial de platino 50 minutos después de la inmersión de la muestra. Grabe el potencial de circuito abierto de la muestra, esto es, el potencial de corrosión el instante antes del inicio de la polarización.

6.9 *Barrido de Potencial* – Inicie el barrido de potencial 1 hora después de la inmersión de la muestra, comenzando al potencial de corrosión (E_{corr}), y aplique el barrido en la dirección mas noble a una velocidad de 0.6 V/h ($\pm 5\%$). Registre la corriente continuamente con cada cambio en el potencial en un registro X-Y usando papel semilogarítmico.

6.9.1 El inicio de la corrosión localizada está usualmente marcado por un rápido incremento de la corriente anódica a potenciales por debajo del potencial de evolución del oxígeno. Cuando la corriente alcanza 5 mA ($5 \cdot 10^3 \mu A$), invierta la dirección de barrido (hacia los potenciales mas activos).

6.9.2 Continúe el barrido inverso hasta cerrar el lazo de histéresis o hasta que sea alcanzado el potencial de corrosión.

6.10 Grafique los datos de polarización anódica en papel semilogarítmico de acuerdo con la práctica G 3 (potencial-ordenada, densidad de corriente-abcisa). Una grafica de las curvas de polarización representativas generadas por la práctica es mostrada en la figura 2.

7. Interpretación de resultados

7.1 Las curvas de polarización mostradas en las figuras 2, 3 y 4 indican que la iniciación y propagación de la corrosión localizada ocurre a potenciales más electronegativos que el potencial de evolución del oxígeno en el acero inoxidable Tipo 304 (UNS S30400) en el medio cloruro. La curva para la aleación C-276 (UNS N10276) no es un resultado de la corrosión localizada pero si de la corrosión uniforme en la región transpasiva o de evolución del oxígeno. Ya que los potenciales de corrosión (valores de E_{corr}) para la aleación C-276 (UNS N10276) y el acero inoxidable Tipo 304 (UNS S30400) son usualmente similares, estas curvas indican que la aleación C-276 es más resistente a la iniciación y propagación de la corrosión localizada que el acero inoxidable Tipo 304 (UNS S30400).

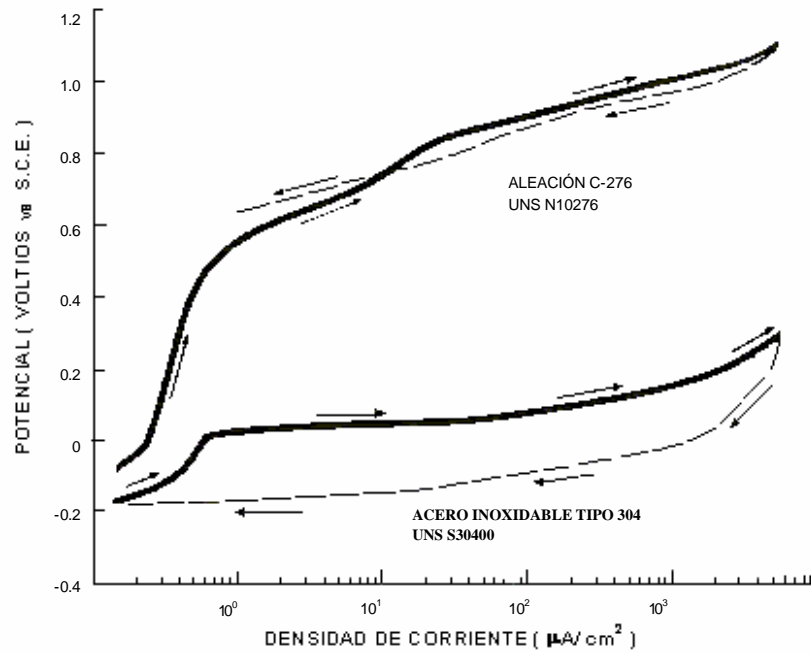


Figura 2. Curvas representativas de polarización potenciodinámica cíclica

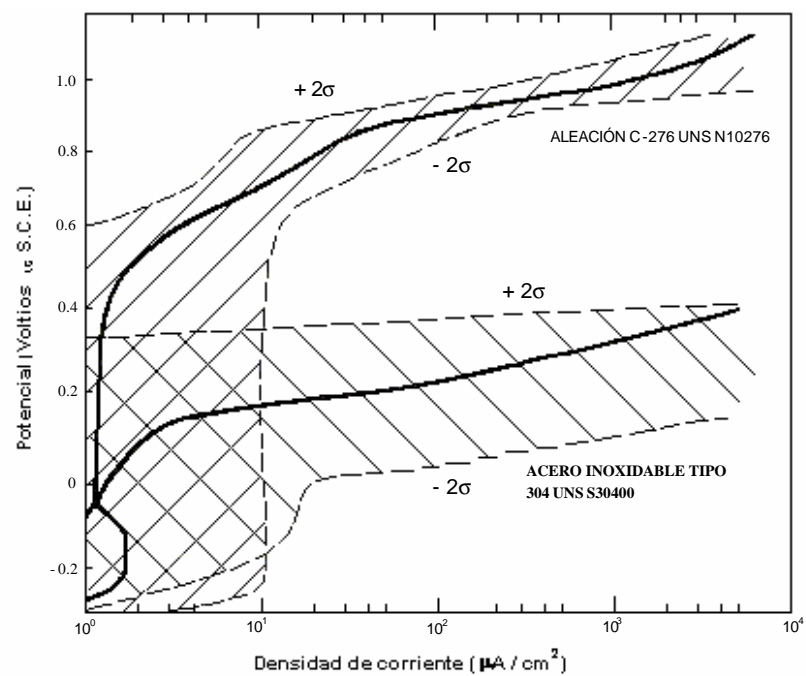


Figura 3. Gráfica estándar de polarización potenciodinámica (barrido hacia delante)

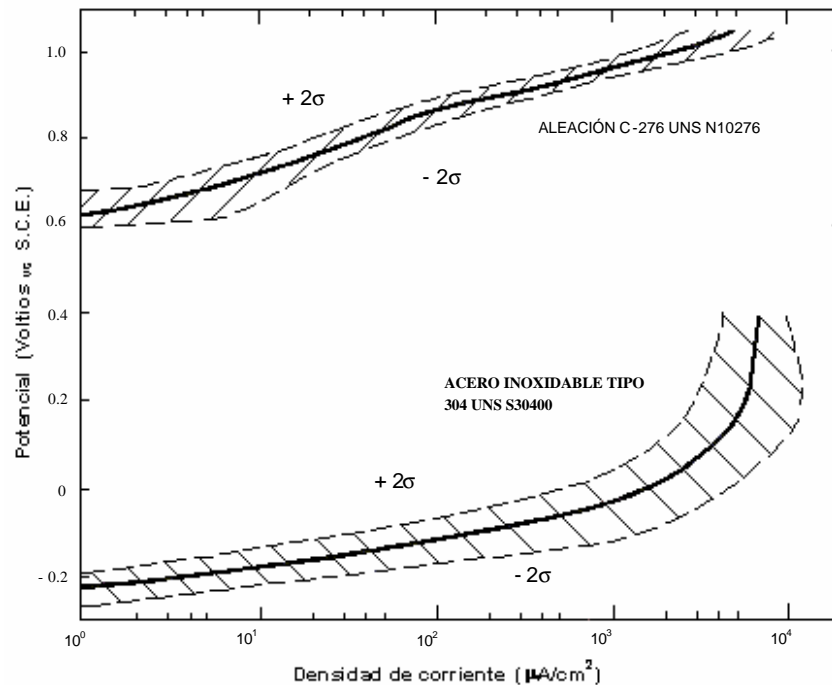


Figura 4. Gráfica estándar de polarización potenciodinámica (barrido inverso)

8. Precisión y desviación

8.1 Ha sido preparada una gráfica de polarización estándar basada en los datos potenciodinámicos de cinco laboratorios diferentes. Para claridad, la gráfica ha sido separada en barrido hacia delante (figura 3) y en barrido inverso (figura 4). Estas gráficas muestran los valores medios y un rango de ± 2 desviaciones estándar.

8.2 La gama de datos obtenidos de un número de laboratorios y usados en la preparación de la gráfica estándar (figuras 3 y 4) demuestran la reproducibilidad que es posible cuando es seguido un procedimiento estándar. Los datos de un investigador deberán caer dentro del rango de ± 2 desviaciones estándar ya que ésta incluye el 95% de todos los datos.

proporcionados, las variaciones aleatorias son la única fuente de error. Ninguna información está disponible sobre la repetición cuando un laboratorio realiza varias pruebas idénticas. La corrosión por agrietamiento bajo las juntas puede conducir a resultados erróneos.

8.3 Cuando se están probando aleaciones basadas en hierro, níquel, y cobalto de acuerdo a este método de prueba, se esperaría que la repetición y reproducibilidad sean similares a las del material estándar. Sin embargo, ningún dato está actualmente disponible para otras aleaciones.

8.4 Este método de prueba cuando es realizado de acuerdo a los procedimientos descritos aquí, clasifica a algunas aleaciones basadas en hierro, níquel, y cobalto con relación a sus resistencias a la corrosión por agrietamiento y por picadura en medios que contienen cloruro, tales como el agua de mar. El método de prueba no necesariamente clasificará los materiales correctamente en medios que son significativamente diferentes a los acuosos, y a los de cloruro de sodio oxigenado a temperatura ambiente. Para otras aleaciones probadas en otros electrolitos, no hay información actualmente.

Denominación: G 102 – 89 (Reaprobada en 1994)

Práctica estándar para el cálculo de velocidades de corrosión e información relacionada con las mediciones electroquímicas

Esta norma es emitida bajo la denominación G 102, el número siguiente a la denominación indica el año de adopción original o, en el caso de revisión, el año de la última revisión. Un número entre paréntesis indica el año de la última reaprobación. Un superíndice epsilon (ε) indica un cambio de editorial desde la última revisión o reaprobación.

1. Alcance

1.1 Esta práctica está destinada a suministrar una guía en la conversión de los resultados de las mediciones electroquímicas en velocidades de corrosión uniforme. Los métodos de cálculo para la conversión de valores de densidad de corriente de corrosión tanto a velocidades de pérdida de masa como a velocidades de penetración promedio son dados para la mayoría de las aleaciones. Además, son proporcionadas algunas guías para la conversión de valores de resistencia de polarización a velocidades de corrosión.

2. Documentos de referencia

2.1 Normas ASTM:

D2776 Métodos de prueba para la corrosividad del agua en la ausencia de transferencia de calor (Métodos Eléctricos).

G 5 Método de prueba de referencia para la realización de mediciones de polarización anódica potencioestática y potenciodinámica.

G 59 Práctica para la realización de mediciones de resistencia de polarización potenciodinámica

3. Importancia y uso

3.1 Las mediciones de velocidad de corrosión electroquímica a menudo suministran resultados en términos de la corriente eléctrica. Aunque la conversión de estos valores de corriente en velocidades de pérdida de masa o en velocidades de penetración está basada en la ley de Faraday, los cálculos pueden ser complicados para las aleaciones y metales con elementos que tienen múltiples valores de valencia. Esta práctica está proyectada para suministrar una guía para calcular velocidades de pérdida de masa y de penetración para tales aleaciones. Son suministrados algunos valores típicos de pesos equivalentes para una variedad de metales y aleaciones.

3.2 Las mediciones de velocidad de corrosión electroquímica pueden proporcionar resultados en términos de la resistencia eléctrica. La conversión de estos resultados tanto a velocidades de pérdidas de masa como de penetración requiere información electroquímica adicional. Son dadas algunas aproximaciones para estimar esta información.

3.3 El uso de esta práctica ayudará en la producción de datos de velocidad de corrosión más consistentes de los resultados electroquímicos. Esto hará los resultados de diferentes estudios más comparables y minimizará los errores de

cálculo que pueden ocurrir en la transformación de los resultados electroquímicos a valores de velocidad de corrosión.

4. Densidad de corriente de corrosión

4.1 Los valores de corriente de corrosión pueden ser obtenidos de las celdas galvánicas y de las mediciones de polarización, incluyendo las extrapolaciones de Tafel o las mediciones de resistencia de polarización. (Ver método de prueba de referencias G 5 y la práctica G 59, para ejemplos). El primer paso es convertir la medida o valor de corriente estimado a densidad de corriente. Esto es llevado a cabo dividiendo la corriente total entre el área geométrica del electrodo expuesta a la solución. Es asumido que la corriente se distribuye uniformemente a través del área usada en este cálculo. En el caso de acoplamientos galvánicos, deberá ser usada el área expuesta de la muestra anódica. Este cálculo se puede expresar como:

$$i_{cor} = \frac{I_{cor}}{A} \quad (1)$$

donde:

i_{cor} = densidad de corriente de corrosión, $\mu\text{A}/\text{cm}^2$,

I_{cor} = corriente anódica total, μA , y

A = área expuesta de la muestra, cm^2 .

Otras unidades pueden ser usadas en este cálculo. En algunos equipos de polarización computarizados este cálculo es hecho automáticamente después que el área de la muestra es programada en el computador. En el apéndice X1 es dado un cálculo simple.

4.2 *Peso Equivalente – EW*, puede ser tomado como la masa del metal en gramos que será oxidada por el paso de un Faradio de carga eléctrica ($96\,489 \pm 2\text{C}$ (amp-seg)).

Nota 1: el valor de *EW* no depende del sistema de unidades escogido y puede ser considerado adimensional.

Para elementos puros, el peso equivalente está dado por:

$$EW = \frac{W}{n} \quad (2)$$

donde:

W = peso atómico del elemento, y

n = número de electrones requeridos para oxidar un átomo del elemento en el proceso de corrosión, esto es, la valencia del elemento.

4.3 Para las aleaciones el peso equivalente es más complejo. Usualmente es asumido que el proceso de oxidación es uniforme y no ocurre selectivamente para algún componente de la aleación. Si esto no es cierto, el cálculo aproximado necesitará ajustarse para reflejar el mecanismo observado. Además, algunos

racionales deben ser adoptados para asignar valores de n a los elementos en la aleación ya que muchos elementos presentan más de un valor de valencia.

4.4 Para calcular el peso equivalente de la aleación puede ser usada la siguiente aproximación. Considere una unidad de masa de la aleación oxidada. El electrón equivalente para 1 gramo de aleación, Q es:

$$Q = \sum \frac{n_i f_i}{W_i} \quad (3)$$

donde:

f_i = fracción de masa del i -ésimo elemento en la aleación,

W_i = peso atómico del i -ésimo elemento en la aleación, y

n_i = valencia del i -ésimo elemento de la aleación.

Por consiguiente, el peso equivalente de la aleación, EW , es el recíproco de esta cantidad:

$$EW = \frac{1}{\sum \frac{n_i f_i}{W_i}} \quad (4)$$

Normalmente solo los elementos por encima del 1% de la masa en la aleación son incluidos en el cálculo. En casos donde no está disponible el análisis real de una aleación, es convencional usar el rango medio de la especificación de la composición para cada elemento, a menos que se disponga de una mejor base. Un cálculo simple es dado en el apéndice X2.

4.5 Las asignaciones de valencia para elementos que exhiben valencia múltiple pueden crear incertidumbre. Es mejor si una técnica independiente puede ser utilizada para determinar la valencia apropiada de cada elemento de la aleación. Algunas veces es posible analizar los productos de la corrosión y usar esos resultados para establecer la valencia apropiada. Otra aproximación es medir o estimar el potencial de electrodo de la superficie que se corroe. Los diagramas de equilibrio que muestran las regiones de estabilidad de varias fases como una función del potencial y el pH pueden ser creados de datos termodinámicos. Estos diagramas son conocidos como diagramas de potencial – pH (Pourbaix) y han sido publicados por varios autores. Los diagramas apropiados para varios elementos de la aleación pueden ser consultados para estimar la valencia estable de cada elemento a la temperatura, potencial y pH del electrolito de contacto que existió durante la prueba.

Nota 2: algunas de las viejas publicaciones usaron datos termodinámicos inadecuados para construir los diagramas y lógicamente estaban en un error.

4.6 Algunos valores típicos del EW para una variedad de metales y aleaciones son dados en la tabla 1.

4.7 *Cálculo de la velocidad de corrosión* - La ley de Faraday puede ser usada para calcular la velocidad de corrosión en términos de velocidad de penetración (*CR*) o velocidad de pérdida de masa (*MR*):

$$CR = K_1 \frac{i_{cor}}{r} EW \quad (5)$$

$$MR = K_2 i_{cor} EW \quad (6)$$

Tabla 1. Valores de peso equivalente para una variedad de metales y aleaciones

Designación común	UNS	Elementos w/Valencia constante	Aluminio		Cobre		Manganeso		Elemento/ Valencia	Peso equivalente
			Valencia variable	Peso equivalente	Valencia variable	Peso equivalente	Valencia variable	Peso equivalente		
Aleaciones de Aluminio:										
AA1100	A91100	Al/3		8.99						
AA2024	A92024	Al/3, Mg/2	Cu/1	9.38	Cu/2	9.32				
AA2219	A92219	Al/3, Mg/2	Cu/1	9.51	Cu/2	9.42				
AA3003	A93003	Al/3, Mg/2	Mn/2	9.07	Mn/4	9.03	Mn/7	8.98		
AA3004	A93004	Al/3, Mg/2	Mn/2	9.09	Mn/4	9.06	Mn/7	9		
AA5005	A95005	Al/3, Mg/2		9.01						
AA5050	A95050	Al/3, Mg/2		9.03						
AA5052	A95052	Al/3, Mg/2		9.05						
AA5083	A95083	Al/3, Mg/2		9.09						
AA5086	A95086	Al/3, Mg/2		9.09						
AA5154	A95154	Al/3, Mg/2		9.08						
AA5454	A95454	Al/3, Mg/2		9.06						
AA5456	A95456	Al/3, Mg/2		9.11						
AA6061	A96061	Al/3, Mg/2		9.01						
AA6070	A96070	Al/3, Mg/2, Si/4		8.98						
AA6161	A96161	Al/3		8.99						
AA7072	A97072	Al/3, Zn/2		9.06						
AA7075	A97075	Al/3, Zn/2, Mg/2	Cu/1	9.58	Cu/2	9.5				
AA7079	A97079	Al/3, Zn/2, Mg/2		9.37						
AA7178	A97178	Al/3, Zn/2, Mg/2	Cu/1	9.71	Cu/2	9.68				

Aleaciones de Cobre:									
CDA110	C11000		Cu/1	63.55	Cu/2	31.77			
CDA220	C22000	Zn/2	Cu/1	58.07	Cu/2	31.86			
CDA230	C23000	Zn/2	Cu/1	55.65	Cu/2	31.91			
CDA260	C26000	Zn/2	Cu/1	49.51	Cu/2	32.04			
CDA280	C28000	Zn/2	Cu/1	46.44	Cu/2	32.11			
CDA444	C44300	Zn/2	Cu/1, Sn/2	50.42	Cu/1, Sn/4	50	Cu/2, Sn/4	32	
CDA687	C68700	Zn/2, Al/3	Cu/1	48.03	Cu/2	30.29			
CDA608	C60800	Al/3	Cu/1	47.114	Cu/2	27.76			
CDA510	C51000		Cu/1, Sn/2	63.32	Cu/1, Sn/4	60.11	Cu/2, Sn/4	31.66	
CDA524	C52400		Cu/1, Sn/2	63.1	Cu/1, Sn/4	57.04	Cu/2, Sn/4	31.55	
CDA655	C65500	Si/4	Cu/1	50.21	Cu/2	28.51			
CDA706	C70600	Ni/2	Cu/1	56.92	Cu/2	31.51			

Tabla 1. Continuación

Designación común	UNS	Elementos								
		w/Valencia constante	Valencia variable	Peso equivalente	Valencia variable	Peso equivalente	Elemento/ Valencia	Peso equivalente	Elemento/ Valencia	Peso equivalente
Aceros inoxidables:										
304	S30400	Ni/2	Fe/2, Cr/3	25.12	Fe/3, Cr/3	18.99	Fe/3, Cr/6	15.72		
321	S32100	Ni/2	Fe/2, Cr/3	25.13	Fe/3, Cr/3	19.08	Fe/3, Cr/6	15.78		
309	S30900	Ni/2	Fe/2, Cr/3	24.62	Fe/3, Cr/3	19.24	Fe/3, Cr/6	15.33		
310	S31000	Ni/2	Fe/2, Cr/3	24.44	Fe/3, Cr/3	19.73	Fe/3, Cr/6	15.36		
316	S31600	Ni/2	Fe/2, Cr/3, Mo/3	25.5	Fe/2, Cr/3, Mo/4	25.33	Fe/3, Cr/6, Mo/6	19.14	Fe/3, Cr/6, Mo/6	16.111
317	S31700	Ni/2	Fe/2, Cr/3, Mo/3	25.26	Fe/2, Cr/3, Mo/4	25.03	Fe/3, Cr/3, Mo/6	19.15	Fe/3, Cr/6, Mo/6	15.82
410	S41000		Fe/2, Cr/3	25.94	Fe/3, Cr/3	18.45	Fe/3, Cr/6	16.28		
430	S43000		Fe/2, Cr/3	25.3	Fe/3, Cr/3	18.38	Fe/3, Cr/6	15.58		
446	S44600		Fe/2, Cr/3	24.22	Fe/3, Cr/3	18.28	Fe/3, Cr/6	14.16		
20CB3 [^]	N08020	Ni/2	Fe/2, Cr/3, Mo/3, Cu/1	23.98	Fe/2, Cr/3, Mo/4, Cu/1	23.83	Fe/3, Cr/3, Mo/6, Cu/2	18.88	Fe/3, Cr/6, Mo/6, Cu/2	15.5
Aleaciones de níquel:										
200	NO2200		Ni/2	29.36	Ni/3	19.57				
400	NO4400	Ni/2	Cu/1	35.82	Cu/2	30.12				
600	NO6600	Ni/2	Fe/2, Cr/3	26.41	Fe/3, Cr/3	25.44	Fe/3, Cr/6	20.73		
800	NO8800	Ni/2	Fe/2, Cr/3	25.1	Fe/3, Cr/3	20.76	Fe/3, Cr/6	16.59		
825	NO8825	Ni/2	Fe/2, Cr/3, Mo/3, Cu/1	25.52	Fe/2, Cr/3, Mo/4, Cu/1	25.32	Fe/3, Cr/3, Mo/6, Cu/2	21.7	Fe/3, Cr/6, Mo/6, Cu/2	17.1
B	N10001	Ni/2	Mo/3, Fe/2	30.05	Mo/4, Fe/2	27.5	Mo/6, Fe/2	23.52	Mo/6, Fe/3	23.23
C-22 [^]	N06022	Ni/2	Fe/2, Cr/3, Mo/3, W/4	26.04	Fe/2, Cr/3, Mo/4, W/4	25.12	Fe/2, Cr/3, Mo/6, W/6	23.28	Fe/3, Cr/6, Mo/6, W/6	17.88
C-276	N10276	Ni/2	Fe/2, Cr/3, Mo/3,	27.09	Cr/3, Mo/4	25.9	Fe/2, Cr/3, Mo/6,	23.63	Fe/3, Cr/6, Mo/6,	19.14

			W/4				W/6		W/6	
G	N06007	Ni/2	Fe/2, Cr/3, Mo/3, Cu/1, Nb/4, Mn/2	25.46	Fe/2, Cr/3, Mo/4, Cu/2, Nb/5, Mn/2	22.22	Fe/3, Cr/3, Mo/6, Cu/2, Nb/5, Mn/2	22.04	Fe/3, Cr/6, Mo/6, Cu/2, Nb/5, Mn/4	17.03
Acero de carbono:			Fe/2	27.92	Fe/3	18.62				
Otros metales:										
Mg	M14142	Mg/2		12.15						
Mo	R03600		Mo/3	31.98	Mo/4	23.98	Mo/6	15.99		
Ag	P07016		Ag/1	107.87	Ag/2	53.93				
Ta	R05210	Ta/5		36.19						
Sn	L13002		Sn/2	59.34	Sn/4	29.67				
Ti	R50400		Ti/2	23.95	Ti/3	15.97	Ti/4	11.98		
Zn	Z19001	Zn/2		32.68						

donde:

CR está dada en mm/año,

i_{cor} está dada en $\mu A/cm^2$,

$K_1 = 3.27 \cdot 10^{-3}$, mm *g/ μA *cm* año (Nota 3),

ρ = densidad en g/cm³ (ver práctica G 1 para valores de densidad de metales y aleaciones usados en las pruebas de corrosión),

$MR = g/m^2d$,

$K_2 = 8.954 \cdot 10^{-3}$, g *cm²/ μA * m² *d (Nota 3).

Nota 3: EW es considerado adimensional en estos cálculos.

Otros valores de K_1 y K_2 para diferentes sistemas de unidades son dados en la Tabla 2.

4.8 Los errores que pueden aparecer a partir de este procedimiento son discutidos a continuación.

4.8.1 La asignación de valores de valencia incorrectos puede causar serios errores.

4.8.2 El cálculo de la penetración o pérdida de masa a partir de las mediciones electroquímicas, como es descrito en esta norma, asume que está ocurriendo una corrosión uniforme. En casos donde están ocurriendo procesos de corrosión no uniforme, el uso de estos métodos puede resultar en una subestimación considerable de los valores reales.

4.8.3 Las aleaciones que incluyen grandes cantidades de metaloides o materiales oxidados no se pueden tratar mediante el procedimiento anterior.

4.8.4 Las velocidades de corrosión calculadas mediante el método anterior donde la abrasión o erosión es un importante contribuyente a los procesos de pérdida de metal pueden producir una subestimación considerable de las velocidades de pérdida de metal.

Tabla 2. Valores de las constantes para usar en la ecuación de Faraday

A				
Unidades de velocidad de penetración (CR)	Unidades de I_{cor}	Unidades de p	K_1	Unidades de K_1^A

mpy	$\mu\text{A}/\text{cm}^2$	g/cm^3	0.1288	mpy g/ $\mu\text{A cm}$
mm/año ^B	A/m^2 ^B	kg/m^3 ^B	327.2	mm kg/A m y
mm/año ^B	$\mu\text{A}/\text{cm}^2$	g/cm^3	$3.27 \cdot 10^{-3}$	mm g/ $\mu\text{A cm y}$

B			
Unidad de velocidad de			
pérdida de masa	Unidades de I_{cor}	K2	Unidades de K_2^A
$\text{g}/\text{m}^2 \text{d}^B$	A/m^2 ^B	0.8953	g/Ad
$\text{mg}/\text{dm}^2 \text{d}$ (mdd)	$\mu\text{A}/\text{cm}^2$	0.0895	$\text{mg cm}^2/\text{A dm}^2 \text{d}$
$\text{mg}/\text{dm}^2 \text{d}$ (mdd)	A/m^2 ^B	$8.953 \cdot 10^{-3}$	$\text{mg m}^2/\text{A dm}^2 \text{d}$

^A EW se asume adimensional.

^B Unidades del SI.

5. Resistencia de polarización

5.1 Los valores de resistencia de polarización pueden ser aproximados tanto en las mediciones potenciodinámicas cercanas al potencial de corrosión (ver práctica G 59) o en una polarización potencioestática usando un pequeño paso de tensión, DE , usualmente de 10 mV o -10 mV, (ver método de prueba D 2776). Comúnmente también son usados valores de ± 5 y ± 20 mV. En este caso, la corriente de la muestra, DI , es medida después que ocurre el estado estable, y DE/DI es calculada. Las mediciones potenciodinámicas dan como resultado curvas de I contra E y el recíproco de la pendiente de la curva (dE/dI) en el potencial de corrosión es medido. En la mayoría de equipos de polarización

potenciodinámica programables, la corriente es convertida a densidad de corriente automáticamente y la gráfica resultante es de i contra E . En este caso, la resistencia de polarización esta dada por dE/di en el potencial de corrosión por lo que 5.2 no es aplicable.

5.2 Es necesario multiplicar dE/di o el valor calculado de $\Delta E/\Delta I$ por el área geométrica de la muestra expuesta para obtener la resistencia de polarización. Esto equivale al cálculo mostrado en 4.1 para la densidad de corriente.

5.3 La constante B de Stern – Geary debe ser estimada o calculada para convertir los valores de resistencia de polarización a densidad de corriente corrosión.

5.3.1 Calcule las constantes de Stern – Geary de las pendientes de Tafel conocidas donde las reacciones catódicas y anódicas son de activación controlada, esto es, hay distintas regiones lineales cerca al potencial de corrosión en una gráfica de $E - \log i$.

$$B = \frac{babc}{2.303(ba + bc)} \quad (7)$$

donde:

b_a = pendiente de la reacción anódica de Tafel, cuando se grafica en papel logarítmico de base 10 en V/década,

b_c = pendiente de la reacción catódica de Tafel, cuando se grafica en papel logarítmico de base 10 en V/década, y

B = constante de Stern – Geary, V.

5.3.2 En casos donde una de las reacciones es puramente de difusión controlada, la constante de Stern – Geary puede ser calculada:

$$B = \frac{b}{2.303} \quad (8)$$

donde:

b = pendiente de Tafel de activación controlada en V/ década.

En este caso deberá ser notado que la densidad de corriente de corrosión será igual a la densidad de corriente de difusión limitada

Un cálculo simple es dado en el apéndice X4.

Los casos donde los efectos de activación y difusión son similares en magnitud, son conocidos como control mixto. La reacción bajo control mixto tendrá un valor de b aparentemente más grande que el predicho para un control de activación, y una gráfica de E contra $\log I$ tenderá a curvarse en una asíntota paralela al eje de

potencial. La estimación de un valor de B para situaciones que involucran control mixto requiere más información en general y está fuera del alcance de esta norma. En general, las ecuaciones 7 y 8 pueden ser usadas, y la velocidad de corrosión calculada mediante estas dos aproximaciones puede ser usada como los límites inferior y superior de la velocidad real.

Nota 4: los electrodos que presentan pasividad estable, se comportaran como si la reacción anódica fue de difusión limitada, excepto que la densidad de corriente pasiva no es afectada por la agitación.

5.3.3 Es posible estimar b_a y b_c de la desviación de linealidad de las curvas de polarización en la región de 20 a 50 mV alrededor del potencial de corrosión. Varias aproximaciones han sido propuestas basadas en los análisis de modelos cinéticos de electrodos.

5.3.4 En casos donde el mecanismo de reacción es conocido en detalle, las pendientes de Tafel pueden ser estimadas de la velocidad de control de paso en el mecanismo de reacción. En general, las pendientes de Tafel están dadas por:

$$b = \frac{KRT}{nF} \quad (9)$$

donde:

K = constante,

R = constante del gas ideal,

T = temperatura absoluta,

n = número de electrones involucrados en el paso de la reacción,

F = constante de Faraday.

A 25°C, $\left(\frac{RT}{2.303F} \right)$ es 59.2 mV/década. Para una simple reacción de electrones, K es usualmente tomada como 2.

5.3.5 En casos donde las pendientes de Tafel no pueden obtenerse por alguno de los métodos anteriormente descritos, puede ser necesario determinar experimentalmente la constante de Stern – Geary mediante la medición de los valores de pérdida de masa y de resistencia de polarización.

5.4 La densidad de corriente de corrosión puede ser calculada de la resistencia de polarización y la constante de Stern - Geary de la siguiente forma:

$$i_{cor} = \frac{B}{R_p} \quad (10)$$

Entonces la velocidad de corrosión puede ser calculada de la corriente de corrosión, como es descrito en la sección 4. Un cálculo de muestra es dado en el apéndice X5.

5.5 Hay varias fuentes de errores en las mediciones de resistencias de polarización:

5.5.1 Los efectos de la resistividad en la solución incrementan la resistencia de polarización aparente, medida mediante métodos potencioestáticos o potenciodinámicos. El efecto de la resistencia de la solución es una función de la geometría de la celda, pero la siguiente expresión puede ser usada para aproximar su magnitud.

$$R_p = R_a - r l \quad (11)$$

donde:

R_a = resistencia de polarización aparente, ohm*cm²,

r = resistividad del electrolito en ohm*cm,

l = distancia entre el electrodo de muestra y la punta de la sonda de Luggin, o el electrodo de referencia, en cm, y

R_p = resistencia de polarización real en ohm*cm².

Los efectos de una resistividad de la solución considerable hacen que la velocidad de corrosión sea subestimada. Un cálculo de muestra es dado en el apéndice X6.

5.5.2 Las técnicas potenciodinámicas introducen un error adicional proveniente de los efectos de cargado capacitivo. En este caso, la magnitud del error es proporcional a la velocidad de barrido. El error es ilustrado mediante la ecuación:

$$I_{total} = I_f + c \left(\frac{dV}{dt} \right) \quad (12)$$

donde:

I_{total} = corriente de celda,

I_f = corriente faradaica asociada con los procesos anódicos y catódicos,

c = capacitancia del electrodo,

dV / dt = velocidad de barrido.

El efecto de carga capacitivo ocasionará un error en la resistencia de polarización calculada. Generalmente este error es pequeño con unas velocidades de barrido moderadas.

5.5.3 Los electrodos que están corroyéndose pueden ser sitio de otras reacciones electroquímicas. En casos donde el potencial de corrosión está dentro de 50 a 100 mV del potencial reversible del electrodo corroyéndose, las reacciones electroquímicas ocurrirán simultáneamente en la superficie del electrodo. Esto causará que el valor de b tanto anódico como catódico aparezca más pequeño que la reacción de corrosión anterior. En consecuencia, la constante B de Stern – Geary será ampliada y la corriente de corrosión predicha será sobrestimada. En este caso, la concentración de iones del electrodo corroyéndose es generalmente de la misma magnitud o mayor que los otros iones participando en el proceso de

corrosión en el electrolito que rodea al electrodo. Otros pares de reducción, que no necesariamente participan en la reacción de corrosión pueden tener efectos similares. Esto es cierto especialmente para metales que exhiben un comportamiento pasivo.

APÉNDICE

X1. CÁLCULO DE MUESTRA – DENSIDAD DE CORRIENTE DE CORROSIÓN

X1.1 *Datos:*

X1.1.1 *Corriente de corrosión* - 27μA.

X1.1.2 *Tamaño de la muestra* - área curva del ánodo expuesta.

X1.1.3 *Diámetro* – 1.30 cm.

X1.2 *Cálculo* – ver ecuación (1) en el texto:

$$i_{cor} = \frac{27.0}{(1.30)^2 \frac{\pi}{4}} = \frac{27.0}{1.32} = 20.3 \frac{mA}{cm^2}$$

X2. CÁLCULO DE MUESTRA – PESO EQUIVALENTE DE UNA ALEACIÓN

X2.1 *Datos:*

X2.1.1 *Aleación* – UNS S31600, composición actual no disponible.

X2.1.2 *Potencial de corrosión* – 300 mV contra SCE 1N de ácido sulfúrico.

X2.2. *Suposiciones:*

X2.2.1 *composición:*

X2.2.1.1 *Cromo* – 16 - 18% - rango medio 17%.

X2.2.1.2 *Níquel* – 10 - 14% - rango medio 12%.

X2.2.1.3 *Molibdeno* – 2 - 3% - rango medio 2.5%.

X2.2.1.4 *Hierro* – balance (ignorar elementos menores).

$$17 + 12 + 2.5 = 31.5$$

X2.2.1.5 Hierro = $100 - 31.5 = 68.5\%$.

X2.2.2 Valores de valencia de la referencia (2)

Cromo: +3

Níquel: +2

Molibdeno: +3

Hierro: +2

X2.3 *Cálculos* – Por simplicidad, se asume 100gr. de aleación disuelta. Por consiguiente, los gramos equivalentes de los componentes disueltos son dados por la ecuación (3).

$$Q = \frac{17}{51.996} * 3 + \frac{12}{58.71} * 2 + \frac{2.5}{95.94} * 3 + \frac{68.5}{55.847} * 2$$

$$Q = 0.981 + 0.409 + 0.078 + 2.453 = 3.921 \text{ g equivalentes}$$

Luego el peso equivalente de la aleación es $\frac{100}{3.921} = 25.50$

X3. CÁLCULO DE MUESTRA PARA LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN A PARTIR DE LA CORRIENTE DE CORROSIÓN

X3.1 Datos y requerimientos – ver x1 y x2.

X3.1.1 Velocidad de corrosión en mm/año.

X3.1.2 Densidad 8.02 g/cm³.

X3.2 Cálculos – ver ecuación (5).

$$K_1 = 3.27 * 10^{-3}$$

$$CR = \frac{3.27 * 10^{-3} * 20.3 * 25.50}{8.02} = 0.211 \text{ mm/año}$$

X4. CÁLCULO DE MUESTRA DE LA CONSTANTE STERN – GEARY

X4.1 Datos caso 1 – Diagrama de polarización de las pendientes de Tafel,

$$b_a = 58.2 \text{ mV/década, y}$$

$$b_c = 114.3 \text{ mV/década.}$$

X4.2 Cálculos de acuerdo con la ecuación (7).

$$B = \frac{58.2 * 114.3}{2.303(58.2 + 114.3)} = 16.74 \text{ mV} \quad o \quad 0.01674 \text{ V}$$

X4.3 Caso 2 – La reacción catódica es de difusión controlada

$$b_a = 58.2 \text{ mV/década}$$

X4.4 Cálculo – ecuación (8):

$$B = \frac{58.2}{2.303} = 25.31 \text{ mV}$$

X5. CÁLCULO DE MUESTRA – CORRIENTE DE CORROSIÓN A PARTIR DE LOS DATOS DE RESISTENCIA DE POLARIZACIÓN

X5.1 Datos - Polarización: 10mV desde el potencial de corrosión.

X5.1.1 *Corriente medida* – 17.1 μA .

X5.1.2 *Tamaño de la muestra* – 14.2 mm de diámetro en un área circular.

X5.1.3 Valores de la pendiente de Tafel dados en X4.

X5.2 Cálculos:

X5.2.1 Densidad de corriente (ver X4):

$$\frac{17.1}{(1.42)^2 \frac{p}{4}} = 10.80 \text{ mA/cm}^2$$

X5.2.2 Cálculo de la resistencia de polarización:

$$R_p = \frac{Ep}{i} = \frac{10 \text{ mV}}{10.80 \text{ mA/cm}^2} = 926 \text{ ohm cm}^2$$

X5.2.3 Corriente de corrosión – ecuación (10)

$$i_{cor} = \frac{B}{Rp} = \frac{25.31 \text{ mV}}{926 \text{ ohm cm}^2} = 27.33 \text{ mA/cm}^2$$

X6. CÁLCULO DE MUESTRA – EFECTOS DE LA RESISTIVIDAD DE LA SOLUCIÓN

X6.1 Datos:

X6.1.1 Resistividad de la solución – 4000 ohm *cm.

X6.1.2 *Distancia entre la punta de Luggin y la muestra – 5 mm.*

X6.1.3 *Resistencia de polarización medida – 9926 ohm*cm².*

X6.2 *Cálculo de la ecuación (11)*

$$R_p = R_a - r l$$

$$R_p = 9926 - 0.5 * 4000$$

$$R_p = 9926 - 2000 = 7926 \text{ ohm cm}^2$$

Nota: en este caso el efecto de la resistividad de la solución ocasiona que la velocidad de corrosión sea subestimada alrededor de un 25%.

ANEXO O. Manual del usuario y de mantenimiento

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	
1. ESPECIFICACIONES DEL EQUIPO	4
2. CELDA ELECTROQUÍMICA	6
2.1 MONTAJE DE LA CELDA	6
2.1.1 Procedimiento para colocar la muestra (ET)	6
2.1.2 Procedimiento para el llenado de la celda	6
2.1.3 Purgado de la solución	6
2.2 ELECTRODO DE REFERENCIA DE Ag / AgCl	7
2.2.1 Cuidados y mantenimiento	7
2.2.2 Verificación del potencial del ER	9
2.3 ELECTRODO AUXILIAR DE PLATINO	10
2.4 ELECTRODO DE TRABAJO	10
2.5 CAPILAR DE LUGGIN	11
2.5.1 Elaboración del tapón de agar - agar	11
2.5.2 Cuidados del capilar de Luggin	12
2.6 DISPOSICIÓN DE LOS ELEMENTOS EN LA CELDA	13
3. POTENCIOSTATO	14
3.1 DESCRIPCIÓN DE CONTROLES	14
3.2 CONEXIONES	15
3.2.1 La celda de prueba y el potenciostato	15
3.2.2 El potenciostato, la red urbana y el computador	15
3.3 CALIBRACIÓN DEL EQUIPO	16
3.3.1 Ajuste del offset	16
3.3.2 Ajuste de la ganancia	16

4. SOFTWARE DE CONTROL	18
4.1 BARRA DE HERRAMIENTAS	18
4.2 BARRA DE MENÚS	19
4.3 OPERACIONES BÁSICAS	20
4.3.1 Selección de una prueba	20
4.3.2 Creación de un archivo nuevo	22
4.3.3 Guardar un archivo	24
4.3.4 Abrir un archivo	25
4.3.5 Borrar un archivo	26
4.3.6 Imprimir un archivo	26
4.3.7 Abortar una prueba	27
4.3.8 Inicio de una prueba	28
4.3.9 Resultados de una prueba	28
4.4 INSTRUMENTACIÓN	31
4.5 AYUDA	34
4.6 REQUISITOS DEL SISTEMA	34
5. GUIA PARA LA REALIZACIÓN DE PRUEBAS ELECTROQUÍMICAS.	35
6. GLOSARIO	37
7. RECOMENDACIONES	39

INTRODUCCIÓN

El equipo trazador de curvas potenciostáticas y potenciodinámicas permite la realización de pruebas de laboratorio para estudiar el comportamiento de muestras metálicas en diversos medios corrosivos acuosos. Está diseñado para efectuar medidas electroquímicas en base a barridos de potencial, tales como polarización anódica potenciostática y potenciodinámica, y polarización potenciodinámica cíclica.

El prototipo está constituido por una celda electroquímica plana, un potenciostato y un computador para la adquisición y graficación de los datos, y el control de las experiencias.

1. ESPECIFICACIONES DEL EQUIPO

Electrodo de Trabajo (ET)	
- Rango de resistores de corriente:	6 Ω a 10 M Ω
- Rangos de corriente a plena escala:	10 nA a 600 mA
Electrodo Auxiliar (EA)	
- Voltaje de salida	± 2 V
- Corriente de salida máxima	1 A
- Protección contra cortocircuito	
Electrodo de Referencia (ER)	
- Impedancia de entrada:	>10 G Ω
- Rechazo, $f < 200$ kHz:	120 dB
- Medida de potenciales en circuito abierto	
Polarización DC	
- Rango de voltaje:	+2 V a -2 V
- Resolución máxima:	0.1 mV (ADC, DAC 16 bits)
Barrido DC	
- Tipo:	rampa
- Altura de paso, Min:	0.1 mV
Max:	3.3 V
Mecánica	
- Alimentación de red:	110 V a 60 Hz
- Dimensiones (alto x ancho x fondo):	105 x 243 x 189 mm
- Peso:	2.2 kg
- Color:	Marfil
- Carcaza metálica	
- Pies antideslizantes	
- Incluye cables de red, seria y electrodos.	

Celda de Prueba

- Tipo:	Celda plana
- Volumen:	250 cm ³
- Área de exposición del ET:	0.7 cm ² , 1 cm ² y 1.5 cm ²
- Electrodo de Referencia (ER):	Ag/AgCl (KCl 3M)
- Electrodo auxiliar (EA):	Platino
Generales	
-Interface PC:	RS-232C
- Software suministrado:	Delphi 5
- Configuración bajo programa de todos los parámetros operacionales: velocidad y amplitud de barrido, potencial inicial, conexión de celda, etc.	
- Incluye el cálculo de parámetros de corrosión: Potencial e intensidad de corrosión, pendientes de Tafel, resistencia de polarización y velocidad de corrosión.	
- Incluye cables de conexión a red, de electrodos e interface serial.	

2. CELDA ELECTROQUÍMICA

2.1 MONTAJE DE LA CELDA

2.1.1 Procedimiento para colocar la muestra (ET)

- ✓ Con la celda descansando en una superficie plana, gire el pie (prensa) hasta que haya suficiente espacio para insertar la muestra entre el pie y la junta.
- ✓ Coloque la muestra y gire el pie hasta asegurarla firmemente contra la junta de teflón. Presione moderadamente para evitar que la solución de prueba se filtre.

2.1.2 Procedimiento para el llenado de la celda

- ✓ Verifique que el cilindro esté completamente limpio.
- ✓ Asegúrese que el ET se encuentra en su lugar.
- ✓ Inserte un embudo en el orificio de llenado.
- ✓ Vierta 200ml de solución dentro de la celda.

2.1.3 Purgado de la solución

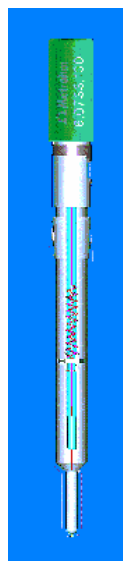
Se recomienda purgar la solución de prueba con un gas inerte (nitrógeno o argón). Para esto, introduzca la sonda del gas de purgado en el orificio de entrada de gases y permita que el gas fluya.

Utilice una velocidad de flujo moderada (emplee un regulador de aguja), de tal forma que el burbujeo no ocasione que la solución de prueba se salga. La boquilla del equipo de purgado debe ser de vidrio, plástico u otro material que no

contamine la solución electrolítica. El proceso de purgado termina poco antes de iniciar el barrido de potencial.

2. 2 ELECTRODO DE REFERENCIA DE Ag / AgCl

Figura 1. Electrodo de referencia de Ag / AgCl



2.2.1 Cuidados y mantenimiento

Antes de la prueba:

- ✓ Manipule el ER con mucho cuidado ya que su cuerpo de vidrio es muy frágil.
- ✓ Verifique que el nivel de la solución interna del ER se encuentre ligeramente por debajo del tapón (véase figura 2); de lo contrario, llene el ER con una solución 3 molar de KCl y agua destilada hasta alcanzar el nivel indicado. En ningún momento permita que dicha solución alcance un nivel muy bajo o se seque completamente ya que esto dañará el electrodo.

Durante la prueba:

- ✓ Mantenga el tapón del electrodo abierto; esto es para evitar que se quiebre debido a la presión ejercida por los gases resultantes de la reacción que ocurre dentro de la celda electroquímica.
- ✓ Introduzca el electrodo dentro del tubo de Luggin. Dicho tubo debe estar lleno de una solución conductora (KCl 1 molar), hasta sumergir toda la punta del electrodo; de esta forma se evita que el ER se contamine con la solución de prueba.
- ✓ Al llenar el tubo Luggin evite la formación burbujas dentro de la solución ya que afectaría la conductividad dentro de ésta. Para prevenir lo anterior, deslice la solución por las paredes del tubo hasta alcanzar el nivel requerido.
- ✓ No permita la circulación de corriente a través del ER. Este tipo de electrodo siempre debe conservar su potencial de referencia.

Después de la prueba:

- ✓ Cierre el tapón y lave el electrodo con agua destilada.
- ✓ Introduzca el ER dentro de un recipiente que contenga una solución de KCl 1 molar; este recipiente debe ser de plástico o de vidrio, tener una tapa plástica y estar bien cerrado para evitar la evaporación de la solución. La solución de conservación debe mantenerse en el nivel indicado (solo se sumerge la punta del electrodo, véase figura 3).

Nota: las soluciones de KCl 1 molar y 3 molar se deben preparar con agua tipo II o IV y KCl de grado analítico (alta pureza).

2.2.2 Verificación del potencial del ER

- ✓ Sumerja el electrodo de referencia (Ag/AgCl) y el electrodo de platino en una solución que contenga iones de plata y cloruro cuya concentración debe ser tal que la actividad de los iones sea igual a 1 ($a=1$).
- ✓ Mida el potencial entre los electrodos y compárelo con el valor consignado en la tabla de óxido – reducción.

Figura 2. Nivel de la solución interna del electrodo de referencia

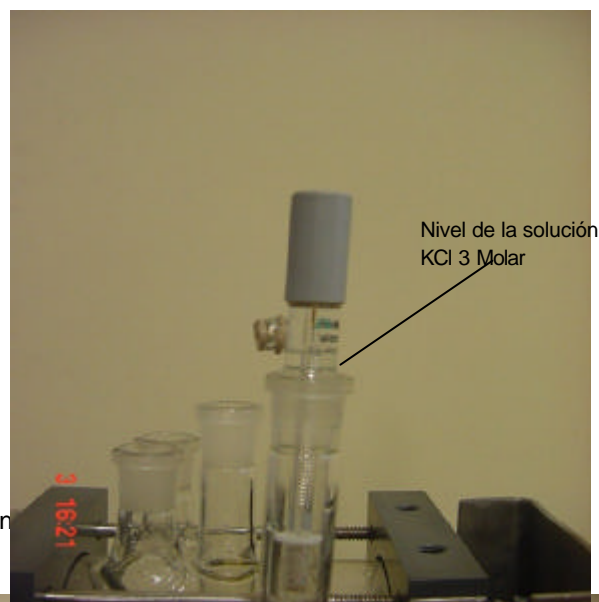
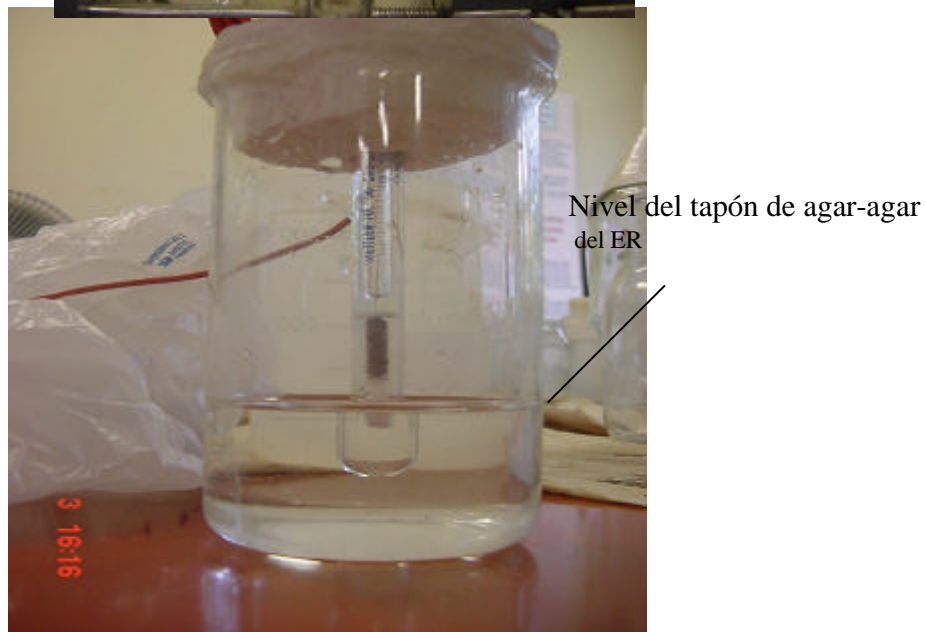


Figura 3. Con



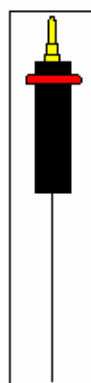
2.3 ELECTRODO AUXILIAR DE PLATINO

El electrodo de platino debe estar absolutamente limpio, enjuáguelo minuciosamente para remover la grasa y el polvo y almacénelo en agua destilada hasta que esté listo para ser usado. Ya que ciertos iones pueden contaminar este electrodo, realice revisiones periódicas del potencial de platino contra un electrodo de referencia conocido (veáse figura 4).

2.4 ELECTRODO DE TRABAJO

La superficie del electrodo de trabajo debe ser lisa y completamente libre de grasas e impurezas. La norma G5-94 describe el procedimiento estándar para realizar la limpieza y preparación del electrodo.

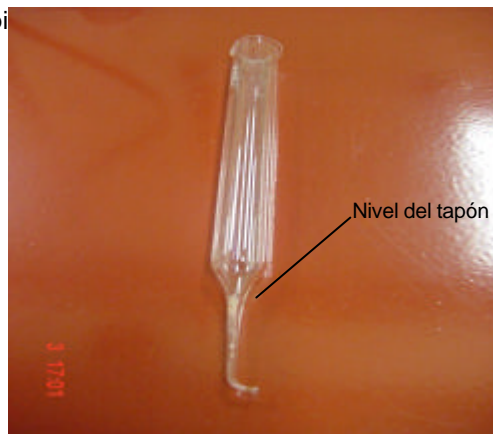
Figura 4. Electrodo de platino



2.5 CAPILAR DE LUGGIN

El tubo de Luggin debe tener un tapón de agar – agar, el cual evita el intercambio de la solución, garantizando que el electrodo de referencia no sea contaminado.

Figura 5. Capi



2.5.1 Elaboración del tapón de agar - agar.

- ✓ Disuelva en un vaso precipitado 150 mg de KCl en 20 ml de agua destilada.
- ✓ Agregue 600 mg de agar-agar y agite constantemente dicha solución en una estufa de calentamiento, retírela cuando aparezcan las primeras burbujas (no se debe dejar hervir).
- ✓ Vierta la solución en un vidrio de reloj, e inmediatamente coloque la punta del tubo Luggin dentro de ésta. Succione por el otro extremo del tubo de modo que el fluido entre hasta alcanzar el nivel indicado (véase figura 5). Se debe tener cuidado de no retirar el tubo Luggin de la solución, porque de lo contrario esta volverá a salir o se formaran burbujas, de modo que se debe mantener

inmóvil y esperar a que la solución se gelatinice, lo cual sucederá en unos 3 o 5 minutos.

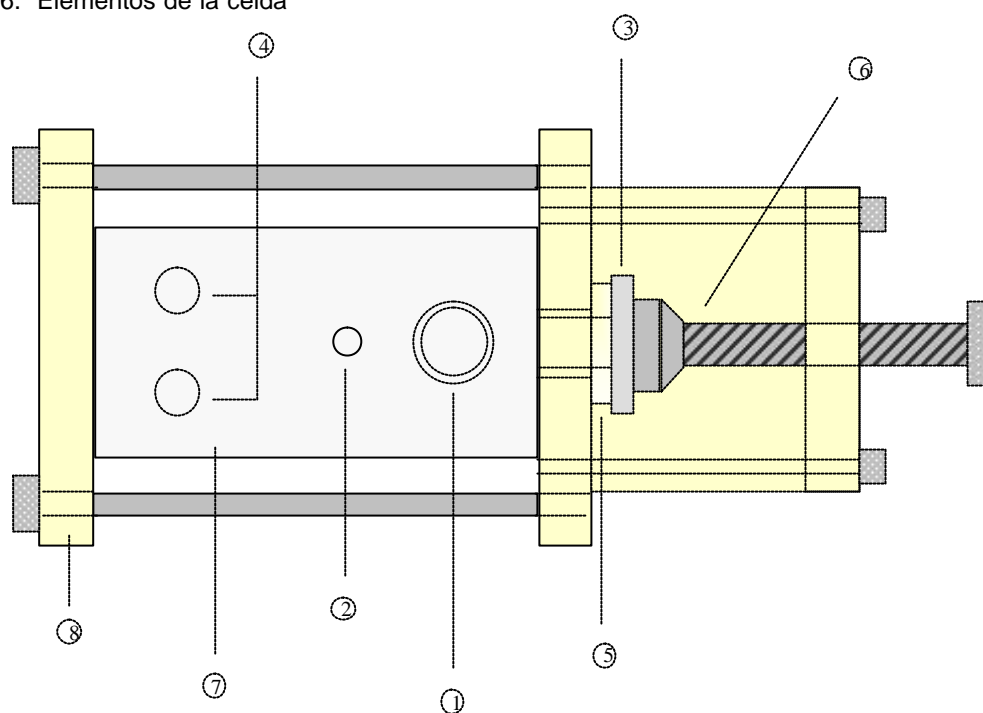
2.5.2 Cuidados del capilar de Luggin.

- ✓ Luego de elaborado el tapón, espere al menos unas 6 horas antes de utilizar el capilar de Luggin.
- ✓ Cuando el capilar no esté en uso, manténgalo sumergido en una solución salina para evitar que el tapón de agar-agar se deteriore.
- ✓ Cambie el tapón de agar-agar cuando se note el intercambio de solución o se encuentre en mal estado.
- ✓ Para renovar el tapón, lave el tubo e introduzca una sonda delgada por la punta hasta desalojar el agar-agar viejo, deje secar el tubo y proceda a llenarlo con la nueva solución preparada según el procedimiento antes descrito.

2.6 DISPOSICIÓN DE LOS ELEMENTOS EN LA CELDA ELECTROQUÍMICA

- ① : orificio para el sistema tubo de Luggin – ER.
- ② : orificio para el electrodo auxiliar.
- ③ : electrodo de trabajo.
- ④ : orificios para el purgado, entrada y salida de gases, toma de temperatura y llenado de la celda.
- ⑤ : junta limitadora de área.
- ⑥ : prensa.
- ⑦ : cilindro de vidrio pirex.
- ⑧ : tapa lateral.

Figura 6. Elementos de la celda



3. POTENCIOSTATO

3.1 DESCRIPCIÓN DE CONTROLES

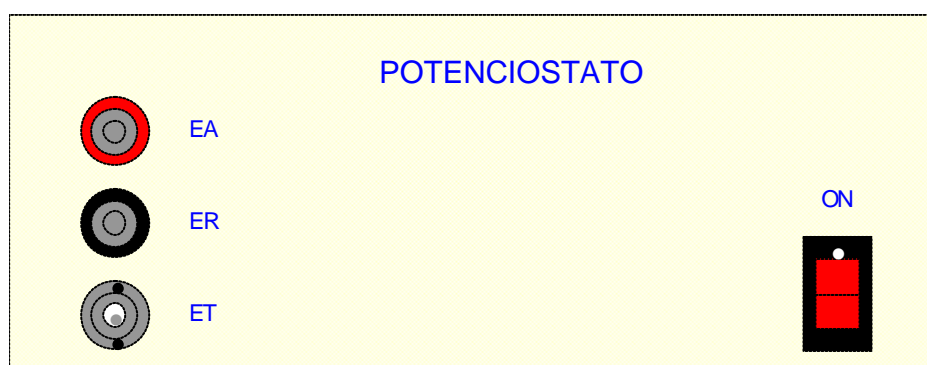
EA: conector del electrodo auxiliar o contraelectrodo.

ER: conector del electrodo de referencia.

ET: conector del electrodo de trabajo.

ON: interruptor de encendido y apagado.

Figura 7. Panel frontal del potenciostato



OFFSET: control de ajuste del offset del DAC714.

GANANCIA: control de ajuste de la ganancia del DAC714.

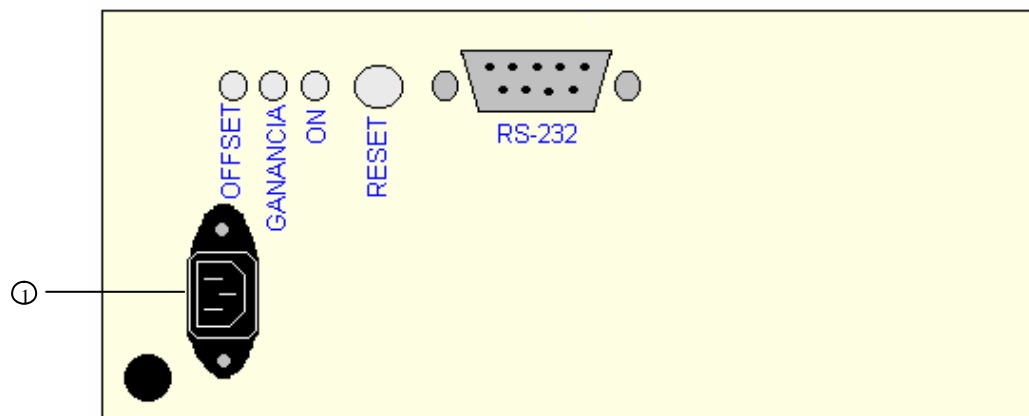
ON: led indicador de encendido de la tarjeta de control.

RESET: reset del PIC16F877.

RS232: conector del cable serial. Comunica al potencióstato con el ordenador.

① : conector cable de alimentación red.

Figura 8. Panel posterior del potencióstato



3.2 CONEXIONES

3.2.1 La celda de prueba y el potenciostato

- ✓ Conecte el cable apantallado con conector BNC en la terminal **ET** del potenciostato, y el otro extremo (caimán) en el electrodo de trabajo de la celda de prueba.
- ✓ Instale el cable del electrodo de referencia (cable negro de referencia 6.2106.020) en la terminal **ER** del potenciostato, y el otro extremo en el cabezal del electrodo de referencia en la celda de prueba.
- ✓ Acople el cable con conector banana en la terminal **EA** del potenciostato y el otro extremo (caimán) en el electrodo auxiliar en la celda de prueba.

3.2.2 El potenciostato, la red urbana y el computador

- ✓ Verifique la puesta a tierra de los tomas de energía a utilizar.
- ✓ Conecte el cable de poder en la parte posterior del potenciostato y el otro extremo a una toma de alimentación de 110v a 60Hz.
- ✓ Conecte un extremo del cable serial al conector **RS-232** (parte posterior del potenciostato), y el otro extremo al puerto serial libre del computador.
Tenga en cuenta que en cada extremo del cable serial se encuentra un conector DB-9 hembra.

3.3 CALIBRACIÓN DEL EQUIPO

3.3.1 Ajuste del offset

- ✓ Conecte el potenciostato únicamente al computador.

- ✓ Conecte el multímetro en el potenciómetro entre las terminales **EA** (positivo) y **ET** (negativo).
- ✓ En el programa de control, abra la *ventana de calibración del equipo* pulsando el botón con el mismo nombre que aparece en la ventana de inicio.
- ✓ En el campo **Enviar**, digite el número cero (0) y pulse *aceptar*.
- ✓ Si el valor registrado en el multímetro es diferente de cero, gire el potenciómetro marcado con **OFFSET** ubicado en el panel posterior del potenciómetro, hasta obtener una lectura de cero (0).

3.3.2 Ajuste de la ganancia









- ✓ Conecte el potenciómetro únicamente al computador.
- ✓ Conecte el multímetro en el potenciómetro entre las terminales **EA** (positivo) y **ET** (negativo).
- ✓ En el programa de control, abra la *ventana de calibración del equipo* pulsando el botón con el mismo nombre que aparece en la ventana de inicio.
- ✓ En el campo **Enviar**, digite un número entre cero (0) y cinco (5) y pulse *aceptar*.
- ✓ Si el valor registrado en el multímetro es diferente al digitado, gire el potenciómetro marcado con **GANANCIA** ubicado en el panel posterior del potenciómetro, hasta obtener una lectura igual a la enviada.

4. SOFTWARE DE CONTROL

4.1 BARRA DE HERRAMIENTAS

Contiene los iconos de acceso directo a las diferentes tareas.

Tabla 1. Iconos de la barra de herramientas

ICONO	DESCRIPCIÓN
	Crea un archivo nuevo.
	Abre un archivo existente.
	Guarda un archivo.
	Imprimir un archivo.
	Lleva a la ventana anterior.
	Lleva a la ayuda del programa de control.
	Cancela la prueba.
	Inicia la prueba.

4.2 BARRA DE MENÚS

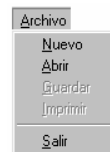
Presenta las funciones principales del software de control.

Figura 9. Barra de menús



- ✓ **Menú Archivo.** Muestra las funciones básicas del programa como son: nuevo, abrir, guardar, imprimir y salir.

Figura 10. Menú Archivo



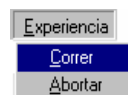
- ✓ **Menú Ver.** Permite observar en forma de texto y gráfica los datos obtenidos en los procesos de purgado y polarización.

Figura 11. Menú Ver



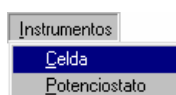
- ✓ **Menú Experiencia.** Permite el inicio y la finalización de la prueba.

Figura 12. Menú Experiencia



- ✓ **Menú Instrumentos.** Contiene información acerca de las características generales de la celda de prueba y el potenciostato.

Figura 13. Menú Instrumentos



- ✓ **Menú Ayuda.** Presenta las opciones donde podrá obtener una breve información sobre los autores del proyecto y la ayuda del software de control.

Figura 14. Menú Ayuda



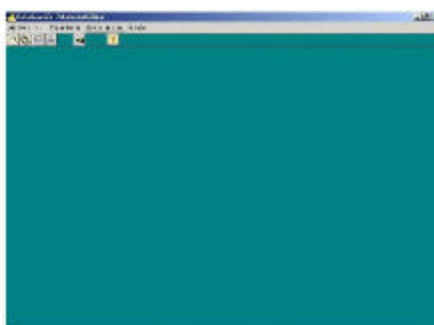
4.3 OPERACIONES BASICAS

4.3.1 Selección de una prueba. En la ventana de inicio (figura 15) seleccione la técnica electroquímica que desee con sólo pulsar el botón marcado con el nombre de la misma, inmediatamente se abrirá la *ventana principal* correspondiente al tipo de prueba seleccionado. En la figura 16 se muestra la ventana principal perteneciente a la prueba de polarización potencioestática.

Figura 15. Ventana de inicio



Figura 16. Ventana principal de la polarización potenciostática



En la *ventana inicio* (figura 15) esta presente la opción de calibración del equipo, haga clic en esta y se desplegará una nueva ventana para realizar esta función (veáse figura 17).

Figura 17. Ventana de calibración del equipo

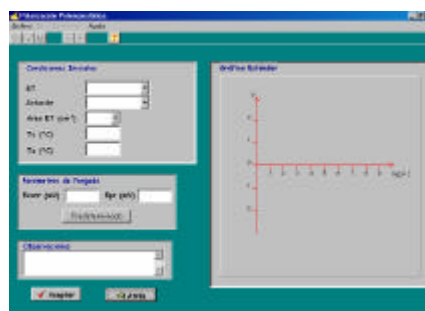


4.3.2 Crear un archivo nuevo. En el menú **Archivo** de la *ventana principal* seleccione **Nuevo**, a continuación se abrirá la ventana de *condiciones iniciales* cuyos campos deberá llenar, luego pulse *aceptar*. La figura 19 muestra esta ventana para el caso de la técnica de polarización potencioestática.

Figura 18. Submenú Nuevo



Figura 19. Ventana de condiciones iniciales (polarización potencioestática)



Esta ventana se divide en cuatro grupos:

Condiciones iniciales. Aquí se consignan las condiciones bajo las cuales se realizará la prueba. Contiene los siguientes campos:

ET, material del electrodo de trabajo. Selecciónelo de lista y si no lo encuentra, escríbalo.

Solución, tipo de electrolito que se empleará en la prueba. Selecciónelo de lista y si no lo encuentra, escríbalo.

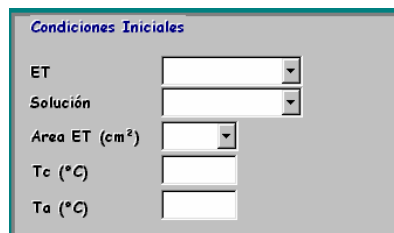
Área ET, área expuesta del electrodo de trabajo, en cm^2 . Selecciónela de la lista.

T_c, temperatura interna de celda, en $^{\circ}\text{C}$.

T_a, temperatura ambiente, en $^{\circ}\text{C}$.

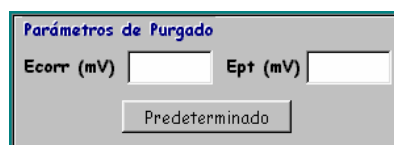
I_u, corriente de umbral, en mA. Es la máxima corriente a la cual se iniciará el barrido inverso en el prueba de polarización cíclica.

Figura 20. Condiciones iniciales



Parámetros de Purgado. Valores de E_{corr} y E_{pt} sensados durante el proceso de purgado, que aparecen automáticamente al finalizar éste. Si se conocen estos datos de pruebas anteriores realizadas bajo las mismas condiciones iniciales y desea obviar el proceso de purgado, pulse el botón de **predeterminado** y digite el valor correspondiente a cada campo.

Figura 21. Parámetros de purgado



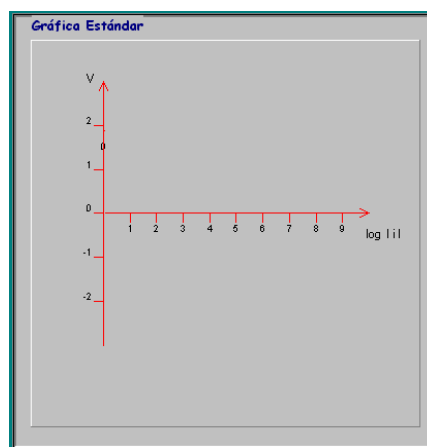
Observaciones. En este campo se consignan las anotaciones que se consideren de relevancia para la prueba y que deberán tenerse en cuenta para pruebas posteriores.

Figura 22. Observaciones



Gráfica Estándar. Gráfica generada en tiempo real a partir de los datos leídos durante el proceso de polarización.

Figura 23. Grafica estándar

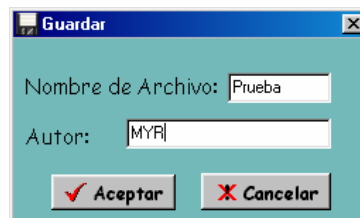


4.3.3 Guardar un archivo. Luego de haber llenado la *ventana de condiciones iniciales* y pulsado *aceptar*, seleccione en el menú **Archivo** el submenú **Guardar**, en la nueva ventana (figura 25) consigne el nombre del archivo y del autor de la prueba, haga clic en *aceptar*.

Figura 24. Submenú guardar



Figura 25. Ventana guardar

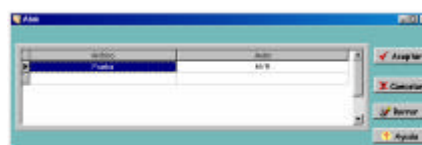


4.3.4 Abrir un archivo. En el menú **Archivo** de la *ventana principal* de la prueba haga clic en **Abrir**, en la nueva ventana (figura 27) seleccione de la lista el archivo deseado y luego pulse *aceptar*. Esto le permitirá visualizar las condiciones iniciales y los resultados de la prueba (ver sección 4.3.9).

Figura 26. Submenú abrir



Figura 27. Ventana abrir



4.3.5 Borrar un archivo. En la *ventana principal* de la prueba seleccione menú **Archivo** y luego **Abrir**, en la nueva ventana (figura 27) escoja de la lista el archivo deseado y luego pulse el botón **Borrar**, inmediatamente aparecerá una ventana (figura 28) en la cual deberá ingresar la *contraseña* para poder borrar el archivo, de lo contrario, no podrá ejecutar esta acción.

Figura 28. Ventana contraseña

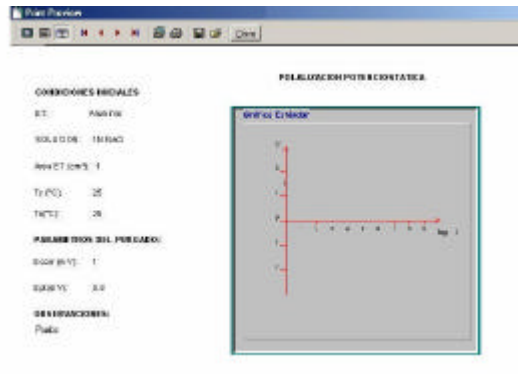


4.3.6 Imprimir un archivo. Luego de abrir un archivo, seleccione en el menú **Archivo** y el submenú **Imprimir** de *la ventana de condiciones iniciales*, en la nueva ventana (figura 30) están consignados todos los datos de la prueba que se abrió anterior, para imprimir pulse el icono de impresión de esta ventana.

Figura 29. Submenú imprimir



Figura 30. ventana de impresión



4.3.7 Abortar una prueba. En la *ventana de condiciones iniciales* de la prueba seleccione menú **Experiencia** y luego el submenú **Abortar**, el cual para suspender la prueba, mostrará antes una ventana de aviso para confirmar esta acción (veáse figura 32). Al pulsar *aceptar* en esta ventana la prueba se suspenderá automáticamente.

Figura 31. Submenú abortar

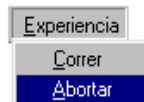
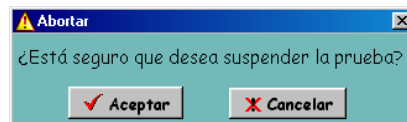


Figura 32. Ventana de confirmación



4.3.8 Inicio de una prueba. Al seleccionar el submenú **Correr** en el menú **Experiencia** de la *ventana de condiciones iniciales*, se visualiza la ventana para

iniciar el proceso de purgado (figura 34); al pulsar *aceptar* en ella, saldrá la *barra de tiempo* que indica la duración de este proceso (veáse figura 35).

Figura 33. Submenú correr



Figura 34. Ventana inicio purgado de la prueba

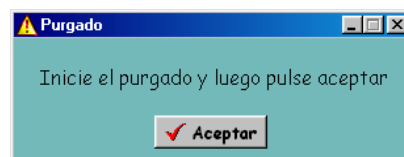
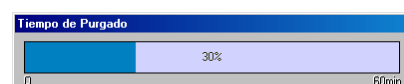


Figura 35. Barra de tiempo del purgado



4.3.9 Resultados de una prueba. El menú **ver** de la *ventana principal* permite observar en forma de texto y gráfica los datos obtenidos en los procesos de purgado y polarización.

La opción **Purgado** del submenú **Resultados** (figura 36), abre una ventana que muestra en forma de texto los datos leídos durante este proceso, los parámetros

obtenidos en el purgado, la hora y la fecha de realización de la prueba (figura 37). El panel de control que aparece en esta ventana permite el manejo de la tabla en la cual están consignados los datos.

La opción **Polarización** presente en el submenú **Resultados** (figura 38), visualiza en forma tabulada los datos leídos en este proceso (véase figura 39). De igual manera, mediante el panel de control de esta ventana se maneja la tabla que contiene los datos.

Figura 36. Opción purgado del submenú resultados



Figura 37. Ventana de resultados del purgado

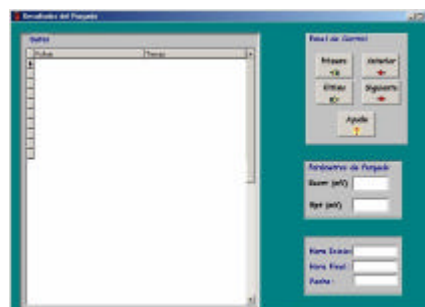
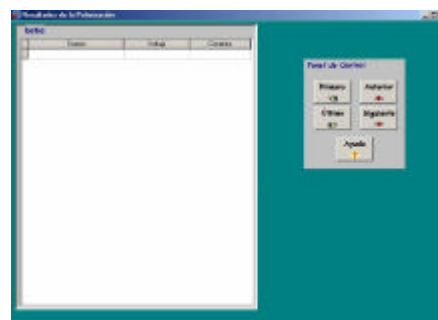


Figura 38. Opción polarización del submenú resultados



Figura 39. Ventana de resultados de la polarización



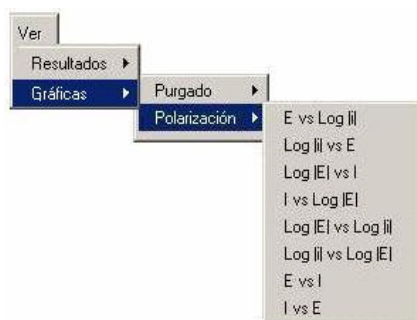
En el submenú **Gráficas**, la opción **Purgado** despliega una ventana que permite graficar los datos del purgado contra el tiempo (veáse figura 40).

Figura 40. Opción de purgado del submenú gráficas



La opción **Polarización** del submenú **Gráficas**, despliega una ventana que presenta varias alternativas para graficar los datos de polarización (figura 41), permitiéndole al usuario analizar los resultados desde diferentes perspectivas.

Figura 41. Opción de polarización del submenú gráficas



4.4 INSTRUMENTACIÓN

En la *ventana principal* en el menú **instrumentos** se encuentran los submenús **Celda** y **Potenciostato** los cuales proporcionan información acerca de las características generales de la celda de prueba y el potenciostato respectivamente (veánse figuras 42-45).

Figura 42. Submenú celda

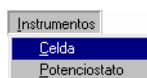


Figura 43. Ventana de características de la celda

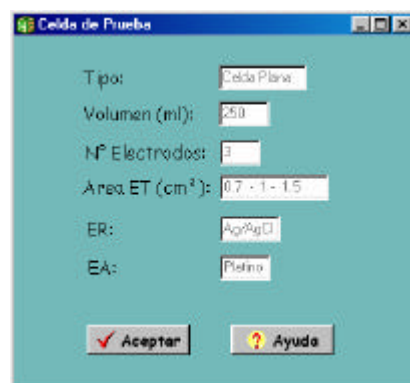
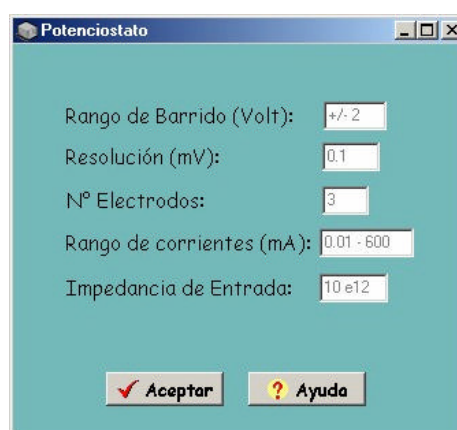


Figura 44. Submenú Potenciostato



Figura 45. Ventana de características del potenciostato



4.5 AYUDA

En el menú **ayuda** se encuentra los submenús **Índice** y **Acerca De** los cuales proporcionan información sobre el software de control y los autores del proyecto, respectivamente (veánse figuras 46-49).

Figura 46. Submenú índice



Figura 47. Ventana de ayuda general

AYUDA GENERAL DEL SOFTWARE DE CONTROL

INDICE

[INTRODUCCIÓN](#)

1. [INSTALACIÓN](#) (Instalación del software)

2. [CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA](#)

3. [INSTRUMENTACIÓN](#)

3.1 [POTENCIOSTATO](#)

3.1.1 Medición de corriente

3.2 [CELDA ELECTROQUIMICA DE PRUEBA](#)

3.3 [CONEXIÓN](#)

4. [SELECCIÓN DE LA TECNICA ELECTROQUIMICA.](#)

4.1 [CALIBRACIÓN DEL EQUIPO](#)

5. [CREACION DE UN ARCHIVO NUEVO](#)

Figura 48. Submenú Acerca De



Figura 49. Ventana Acerca De



4.6 REQUISITOS DEL SISTEMA

- ✓ Procesador mayor de 500 Mhz
- ✓ Microsoft windows 98 o superior
- ✓ Un puerto serial adicional con conector DB-9.
- ✓ Memoria RAM de 32 MB mínimo.
- ✓ Espacio en disco duro de 1Gb
- ✓ Unidad de CD ROM.
- ✓ Configuración regional (discrimina la coma y punto) . Ruta :
 Inicio - configuración - panel de control – configuración regional;
 Símbolo decimal (punto)
 Símbolo de separación de miles (coma)
 Inicio - configuración - panel de control – configuración regional - moneda;
 Símbolo decimal (punto)
 Símbolo de separación de miles (coma)
- ✓ Elección del puerto serial del PC; el equipo debe ser conectado al COM 1

5. GUIA PARA LA REALIZACIÓN DE PRUEBAS ELECTROQUÍMICAS

- ✓ Realice el montaje de la celda y el ET (ítem 1.1.1).

- ✓ Llene la celda con la solución de prueba (ítem 1.1.4).
- ✓ Coloque el EA y el sistema tubo de luggin - ER en la celda, cerciórese que éste último tenga el tapón abierto (ítems 1.2.1).
- ✓ Conecte los cables de los electrodos a sus respectivos terminales en el potenciostato (ítem 3.2.1).
- ✓ Instale el equipo de purgado (pipeta de gas inerte, mangueras, válvulas, entre otras).
- ✓ Encienda el potenciostato.
- ✓ Escoja en el software de control la prueba a realizar, llenando los campos que ésta requiera (ítem 4.3.2).
- ✓ Inicie el purgado de la solución si es necesario (ítem 1.1.3).
- ✓ Pulse aceptar cuando todos los campos estén llenos y posteriormente pulse correr (ítem 3.4.8).
- ✓ Al terminar el proceso de purgado desinstale con mucho cuidado el equipo de purgado y se dará inicio al proceso de polarización (automático).
- ✓ El computador visualizara en tiempo real y almacenara los datos.

- ✓ Al finalizar la prueba visualice los resultados arrojados por la prueba (ítem 4.3.9).

6. GLOSARIO

CAPILAR O TUBO DE LUGGIN: compartimiento lleno de una solución conductora que provee un óptimo posicionamiento del E.R.

CELDA ELECTROQUÍMICA: término usado para describir los equipos empleados para la medición de los parámetros electroquímicos, usualmente esta constituida por el electrolito y los electrodos de trabajo, auxiliar y de referencia.

CURVAS DE CORROSIÓN: curvas que describen en forma gráfica la velocidad de corrosión de un metal en un medio determinado.

DELPHI: es una potente herramienta de desarrollo de programas que permite la creación de aplicaciones para Windows.

ELECTRODO: conductor eléctrico a través del cual entra o sale una corriente eléctrica en un medio, ya sea dicho medio una solución electrolítica, un sólido, una masa fundida, un gas ó el vacío.

ELECTRODO DE REFERENCIA: electrodo que tiene un potencial estándar con respecto al electrodo de hidrógeno de referencia (ejemplo: Ag/AgCl, Calomel saturado, etc.).

ELECTRODO DE TRABAJO: es el especimen de prueba estudiado en una celda electroquímica.

ELECTROLITO: solución de iones en un disolvente polar el cual permite el flujo de corriente eléctrica debido a la migración iónica.

POLARIZACIÓN: cambio del potencial de electrodo de circuito abierto como resultado del paso de corriente.

POLARIZACIÓN POTENCIODINÁMICA O POTENCIOCINÉTICA: técnica en la cual se varía el potencial de un electrodo en forma continua a una velocidad preestablecida.

POLARIZACIÓN POTENCIOSTÁTICA: técnica para el mantenimiento de un potencial de electrodo constante.

POTENCIAL DE CIRCUITO ABIERTO: potencial de un electrodo medido con respecto a un electrodo de referencia u otro electrodo, cuando ninguna corriente fluye hacia o desde éste.

POTENCIOSTATO: instrumento electrónico para mantener un electrodo de trabajo a un potencial constante el cual permite las mediciones de corriente como una función del tiempo.

PROTOCOLO: procedimientos y formatos comunes que permiten compartir recursos entre computadores. Establecen puentes lógicos entre distintas tecnologías y gobiernan los elementos de comunicación de datos.

RS-232: conjunto de especificaciones que definen la comunicación serial entre un DTE (equipo terminal de datos, normalmente un ordenador o una terminal) y un DCE (equipo de comunicación de datos, normalmente un modem). El interfaz RS-232 define parámetros de la comunicaciones tales como paridad, número de bits de parada y la baudio-rate.

7. RECOMENDACIONES

1. Leer el manual de usuario y mantenimiento antes de utilizar el equipo para evitar su inadecuada utilización o que alguno de sus componentes se dañe.

2. En caso de que uno de los electrodos se deteriore, hacer el pedido respectivo a las siguientes empresas:

✓ Electrodo de Ag/AgCl (ref. Metrohm 6.0733.100)

Empresa: polco s.a.

Email: polco@epm.net.co

Conmutador: 3203211

Fax : 2880074

Ciudad: Bogotá

✓ Electrodo de platino (ref. MW-1032)

Empresa: Dlo Químicos Ltda.

Conmutador: 4135077 - 4114586

Fax : 4126244

Ciudad: Medellín

✓ Celda electroquímica plana en vidrio

Empresa: Corporación para la Investigación de la Corrosión

Email:

Conmutador: 6550807 -6550809

Fax : 6550808

Ciudad: Piedecuesta - Santander